



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Tesi di laurea specialistica  
Ingegneria Aerospaziale – Ind. Spaziale

# Corpo di calibrazione: confronto al CFD fra configurazioni di flusso libero e flusso in galleria del vento

**Candidato**

Loris Campanini

**Relatore**

Prof. Ing. Giovanni Lombardi

Anno Accademico 2008-2009



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AEROSPAZIALE

*Alla mia famiglia*

# Sommario

|  |     |
|--|-----|
| Indice delle figure .....  | III |
| Introduzione .....   | 1   |
| Aerodinamica .....   | 3   |
| 2.1 Galleria del vento .....                                       | 5   |
| 2.2 Correlazione flusso libero e galleria del vento .....          | 10  |
| 2.3 Corpo di calibrazione .....                                    | 11  |
| 2.4 Analisi al CFD.....  | 13  |
| Corpo di calibrazione .....  | 15  |
| 3.1 Artemio .....  | 17  |
| 3.2 Strumenti di misura: le balance .....                          | 21  |
| 3.3 Struttura interna ed esterna .....                             | 24  |
| 3.4 Movimentazione.....  | 25  |
| Analisi CFD .....  | 27  |
| 4.1 Mesh superficiale di Artemio .....                             | 28  |
| 4.2 Scelta della griglia.....                                      | 33  |
| 4.3 Generazione della griglia volumetrica tramite Tgrid.....       | 36  |
| 4.4 Mesh di Artemio.....   | 36  |
| 4.4.1 Caso di flusso libero.....                                   | 37  |
| 4.4.2 Caso di flusso in galleria del vento senza STING .....       | 40  |
| 4.4.3 Caso di flusso in galleria del vento .....                   | 43  |
| 4.5 Domini nello spazio di integrazione .....                      | 46  |
| 4.5.1 Domini caso flusso libero.....                               | 47  |
| 4.5.2 Domini caso di galleria con e senza strutta di supporto..... | 50  |

|  |     |
|--|-----|
| 4.6 Simulazione CFD con FLUENT 6.3.26 .....                    | 53  |
| 4.6.1 Modello standard K- $\epsilon$ .....                     | 56  |
| 4.6.2 Modello RSM.....   | 59  |
| Discussione dei risultati.....                                 | 67  |
| 5.1 Rappresentazione del $C_p$ .....                           | 69  |
| 5.2 Rappresentazione del modulo della velocità .....           | 74  |
| 5.3 $C_p$ , Artemio in sezione .....                           | 79  |
| 5.4 Linee di corrente.....                                     | 86  |
| 5.5 Linee di corrente - Particolari .....                      | 91  |
| 5.6 Risultati numerici .....                                   | 96  |
| Conclusioni .....  | 99  |
| 6.1 Sviluppo del corpo di calibrazione, Artemio.....           | 100 |
| 6.2 Simulazioni con FLUENT di Artemio .....                    | 101 |
| 6.3 Interazioni corpo di calibrazione galleria del vento ..... | 103 |
| Appendice .....  | 106 |
| Bibliografia .....   | 107 |
| Ringraziamenti .....   | 109 |



# Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Galleria del vento .....  | 6  |
| Figura 2 - Sting e bracci ruota (configurazione wheels off) .....                        | 9  |
| Figura 3 - Sting e bracci ruota (configurazione wheels off) .....                        | 10 |
| Figura 4 - Ahmed Body .....  | 11 |
| Figura 5 - Simulazioni Ahmed body .....  | 12 |
| Figura 6 - Simulazione IRL - Formula Indy .....  | 13 |
| Figura 7 - Ahmed studies .....   | 15 |
| Figura 8 - Ahmed series .....  | 16 |
| Figura 9 - Artemio .....   | 18 |
| Figura 10 - Grand-Am e DTM .....   | 19 |
| Figura 11 - Prese di pressione .....   | 21 |
| Figura 12 - Schema assemblaggio bilancia .....   | 22 |
| Figura 13 – Bilancia .....   | 23 |
| Figura 14 - Struttura interna bilancia .....   | 23 |
| Figura 15 - Parte terminale modulare .....   | 25 |
| Figura 16 - Mesh superficiale Artemio - Flusso libero .....                              | 31 |
| Figura 17 - Mesh superficiale Artemio - Flusso in galleria del vento                     | 32 |
| Figura 18 - Mesh superficiale di suolo .....   | 33 |
| Figura 19 - Mesh superficiale di galleria .....  | 34 |
| Figura 20 - Mesh volumetrica Artemio .....   | 37 |
| Figura 21 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso libero .....                               | 40 |
| Figura 22 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso libero .....                     | 41 |
| Figura 23 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso in galleria del vento<br>senza STING ..... | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso in galleria del vento senza STING ..... | 44 |
| Figura 25 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso in galleria del vento .....                       | 46 |
| Figura 26 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso in galleria del vento .....             | 48 |
| Figura 27 - Domino e sottodomini in caso di flusso libero .....                                 | 49 |
| Figura 28 - $Y_{wall+}$ caso di flusso libero .....   | 51 |
| Figura 29 - Dominio e sottodomini in caso di flusso in galleria del vento .....                 | 52 |
| Figura 30 - $Y_{wall+}$ caso di flusso in galleria del vento .....                              | 54 |
| Figura 31 - Linee di flusso sul fondo nei due casi .....  | 94 |
| Figura 32 - Linee di flusso in scia nei due casi .....  | 95 |
| Figura 33 - Particolare della scia – Artemio in galleria .....                                  | 96 |
| Figura 34 – Particolare della formazione del vortice a ferro di cavallo .....                   | 96 |
| Figura 35 – Particolare della scia sul dorso nei due casi .....                                 | 97 |

# 1

## Introduzione

---

Negli ultimi decenni si è assistito a un continuo incremento delle prestazioni dei veicoli stradali e da competizione, ciò ha portato in particolare a sviluppare corpi dall'aerodinamica sempre più raffinata ed evoluta, in cui l'effetto suolo rappresenta l'elemento di maggiore importanza.

Tale sviluppo è stato possibile grazie a due fattori, ovvero la disponibilità di impianti di prova in scala ridotta sempre più grandi, precisi e versatili, tali da fornire su una varietà molto ampia di configurazioni dati estremamente affidabili e verosimili, e la notevole evoluzione della fluidodinamica computazionale dovuta alla maggiore potenza di calcolo disponibile e a metodi di analisi sempre più raffinati.

Il presente lavoro nasce dalla necessità di investigare e capire gli effetti di interazione flusso aerodinamico, corpo e galleria del vento, al fine di comprendere le alterazioni dovute alla presenza di pareti e strutture di supporto. Tali interazioni potrebbero dar luogo ad un differente flusso aerodinamico attorno al corpo, rispetto alla condizione di flusso libero, con conseguente inquinamento dei risultati.

L'analisi sarà realizzata alla fluidodinamica computazionale, utilizzando un corpo noto di riferimento concepito specificatamente e successivamente costruito per essere impiegato come corpo di calibrazione, così da soddisfare la necessità di poter verificare rapidamente eventuali variazioni nel comportamento della galleria del vento, traducibili in una variazione dei risultati non imputabile al modello, tramite il corpo di calibrazione di cui si conosce con estrema precisione e ripetibilità ogni caratteristica fluidodinamica. In seguito tale corpo dovrà poter essere utilizzato anche come riferimento e confronto per le analisi fluidodinamiche computazionali con i metodi numerici più raffinati, allo scopo di confutarne caratteristiche, pregi e difetti.

Il corpo di calibrazione dovrà avere la maggiore semplicità costruttiva possibile per contenere costi ed essere realizzabile in modo semplice, mantenendo le medesime caratteristiche aerodinamiche degli autoveicoli .

# 2

## Aerodinamica

---

Le forze aerodinamiche agenti su di un'automobile sono il risultato di complesse interazioni fra corpo vettura, flusso libero e suolo. La progettazione dei moderni veicoli comporta una profonda conoscenza di tale interazione, al fine di poterla sfruttare al meglio per ottenere le migliori prestazioni possibili, traducibili in una bassa resistenza per i modelli di produzione in serie e un elevato carico verticale ed efficienza per i modelli destinati alle competizioni sportive.

L'attuale stato dell'arte dell'aerodinamica dell'autoveicolo è stato raggiunto grazie a due strumenti fondamentali, che hanno consentito la profonda comprensione della fenomenologia fisica del flusso aerodinamico attorno ad un corpo. Il primo è la fluidodinamica

computazionale, che grazie a una sempre maggiore potenza di calcolo disponibile nei moderni calcolatori e a codici numerici sempre più raffinati, consente la visualizzazione del flusso aerodinamico nella sua totalità. Il secondo è la galleria del vento, in cui è possibile valutare con estrema precisione gli effetti in termini di forze agenti sul corpo e distribuzioni di pressione, come flussi interni per aspirazioni motore o raffreddamento radiatori e freni, di un singolo elemento della carrozzeria dell'automobile.

La fluidodinamica computazionale consente la visualizzazione dell'intero flusso aerodinamico che lambisce il corpo, dimostrandosi per tale motivo uno strumento molto potente, è impiegata come guida preliminare per lo sviluppo aerodinamico dei moderni veicoli, ma presenta ancora alcune problematiche, come la scarsa precisione nei valori assoluti in termini di forze agenti sul corpo e l'incapacità di predire con precisione fenomeni non stazionari come separazioni di strato limite.

La galleria del vento è impiegata per valutare l'effetto di una singola modifica della forma esterna del veicolo, permettendo di valutare con estrema precisione l'entità di tutte le forze agenti sul corpo, e di conoscere tramite sonde i valori di pressione totale e statica in ogni punto d'interesse. È assolutamente fondamentale che le condizioni di prova siano un riferimento assoluto, tale da fornire per un determinato corpo i medesimi risultati con la massima precisione possibile.

Per risolvere le problematiche sopra esposte sono utilizzati i corpi di calibrazione, che consentono di valutare l'accuratezza

dell'analisi fluidodinamica e di confermare l'assoluta ripetibilità dell'impianto di prova.

### 2.1 Galleria del vento

La galleria del vento è uno strumento ampiamente utilizzato nel settore automobilistico, sia per i veicoli di destinazione stradale, sia in misura notevolmente maggiore per i veicoli destinati alle competizioni sportive, in cui il suo grande impiego costituisce uno degli elementi di maggiore impatto sulle prestazioni e sui costi del prodotto finale. Statisticamente esiste una diretta correlazione fra il numero di ore in galleria e le caratteristiche aerodinamiche del corpo finale, tale per cui il tipo di automobile con la più sofisticata aerodinamica al mondo, vale a dire un formula 1, può senza difficoltà essere il risultato di diecimila ore di galleria, mentre molte vetture di classe sport sono nate solo con poche centinaia di ore di sviluppo sperimentale. Ovviamente come già detto, il costo dei due prodotti differisce di svariati ordini di grandezza.

Ciò che accade nella realtà si può riassumere come un corpo tozzo mobile a una determinata velocità immerso in un fluido e in prossimità del suolo, con la condizione di fluido e suolo a velocità relativa nulla, mentre in galleria del vento si sfrutta il principio di reciprocità secondo cui solo la velocità relativa fra corpo e fluido è determinante nello sviluppo delle forze aerodinamiche. Rispetto ad un sistema di riferimento inerziale il corpo risulta fermo e il fluido in moto, ma ciò non è sufficiente, risulta infatti necessario garantire la condizione di velocità relativa nulla fra suolo e fluido altrimenti la

## Galleria del vento

zona inferiore del veicolo sarebbe investita da uno strato di flusso lento, lo strato limite in prossimità del suolo della galleria, portando ad una errata simulazione della realtà, in cui il fondo piatto lavora in modo completamente diverso e l'errore commesso sulle forze rilevate può essere dell'entità del 30~ 40%.

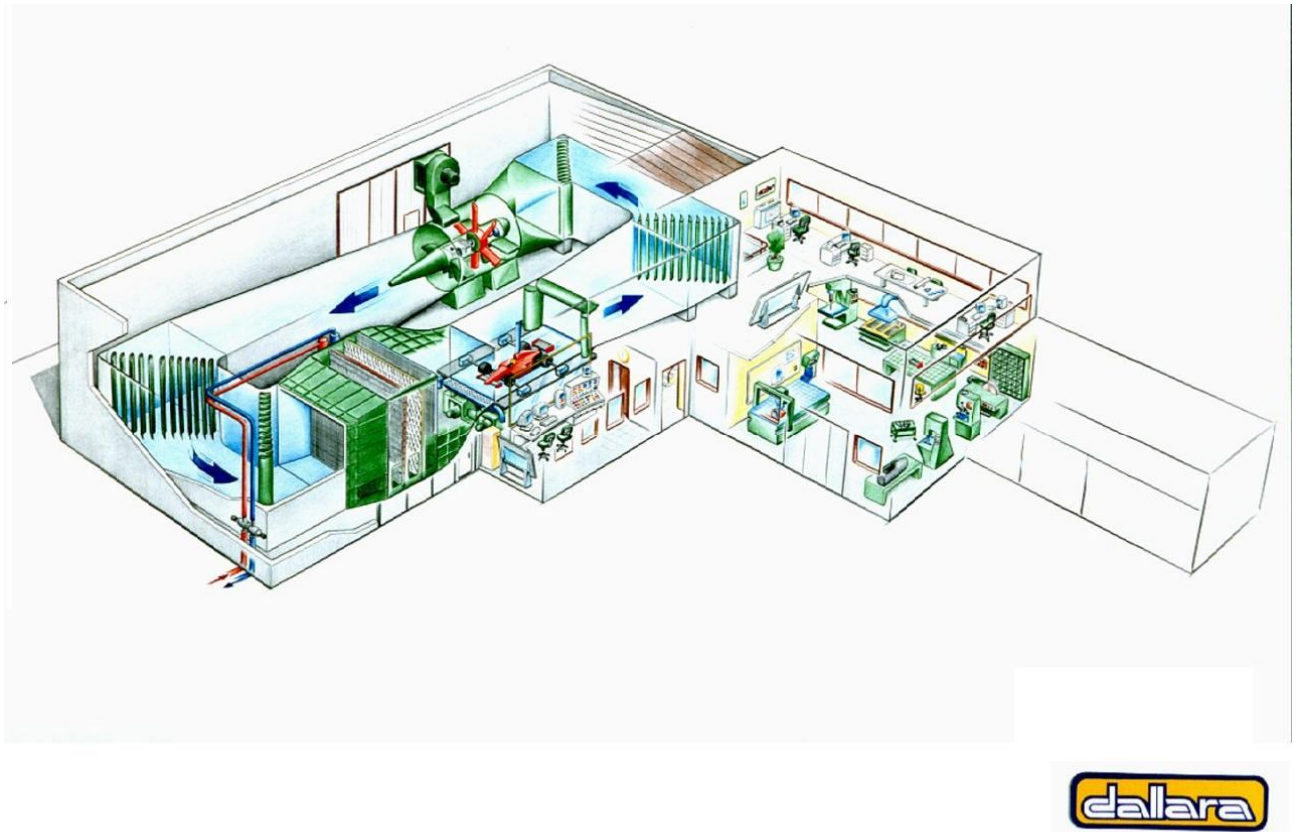


Figure 1 - Galleria del vento

La struttura generale di una galleria del vento automobilistica (Figura 1 - Galleria del vento) è rappresentata da un circuito chiuso in cui il fluido è accelerato da una ventola, segue un parte di condotto in cui si stabilizza, attraversa una serie di reti e strutture a nido d'ape per impedire l'ingresso in camera di prova di corpi estranei ed eliminare le strutture turbolente di scala maggiore, dopodiché tramite un



convergente accelera a velocità dell'ordine di 50~70 metri al secondo in camera di prova, dove è presente un dispositivo di suolo mobile grazie al quale si realizza la condizione di velocità relativa nulla fra fluido e suolo. Il suolo mobile è estremamente sofisticato, basti pensare che richiede circa il 10% del costo dell'impianto, ma da solo non basta per garantire un flusso uniforme e coerente, deve infatti essere preceduto da un aspiratore di strato limite, che aspira la zona di fluido a bassa velocità in corrispondenza del suolo.

Nonostante vari decenni di sviluppo la galleria del vento presenta ancora alcune problematiche ed approssimazioni, a seguito del quale il flusso attorno al corpo risulta differente rispetto alla condizione reale a causa di svariati fattori, fra cui effetti di bloccaggio, flusso non parallelo, interazione con le strutture di supporto.

Effetti di bloccaggio sono originati da modelli con sezione frontale notevole rispetto alla sezione della camera di prova, una scelta progettuale che consente di sfruttare al meglio l'impianto disponibile realizzando numeri di Reynolds più elevati possibile e quindi più vicini alla condizione reale, ma che per contro genera una profonda interazione del flusso attorno al corpo con le pareti, sviluppando un campo di pressione anomalo, che principalmente si traduce in una maggiore resistenza rilevata dagli strumenti. Esiste quindi un delicato equilibrio fra questi fattori contrastanti che portano alla massima ottimizzazione dell'impianto, fra costi di progettazione e mantenimento e accuratezza dei risultati. Una delle soluzioni tecniche specifiche più efficaci adottate per ridurre questo problema, consiste nel realizzare le pareti della camera di prova fessurate, permettendo il

passaggio di fluido in una camera esterna e garantendo una pressione statica costante per l'intera lunghezza.

La condizione di flusso parallelo nei moderni impianti è realizzata con molta accuratezza grazie a svariati accorgimenti, come reti a nido d'ape prima del convergente per eliminare le scale turbolente più grandi generate dalla ventola e flap nei vari angoli dell'impianto per evitare il distacco del flusso dalle pareti interne, ma nonostante ciò alcune fonti di disturbo non possono per loro stessa natura essere eliminate. Il sistema di aspirazione dello strato limite posto prima del suolo mobile, necessario per aspirare lo strato di fluido a bassa velocità in corrispondenza del suolo sviluppatosi lungo il condotto, genera una componente verticale di velocità interpretabile come una perturbazione costante e non eliminabile.

Le strutture di supporto necessarie per vincolare il corpo in modo da poter eseguire rispetto ad esse movimentazioni estremamente precise e ripetibili, ovvero gli STING per il corpo e in caso WHEELS OFF i bracci ruota (Figura 2 e 3 - Sting e bracci ruota (configurazione wheels off)), interagiscono con il flusso sviluppando scie e in minima parte anche vortici, che a loro volta tendono a modificare il campo di pressione attorno al corpo e le forze rilevate dagli strumenti.

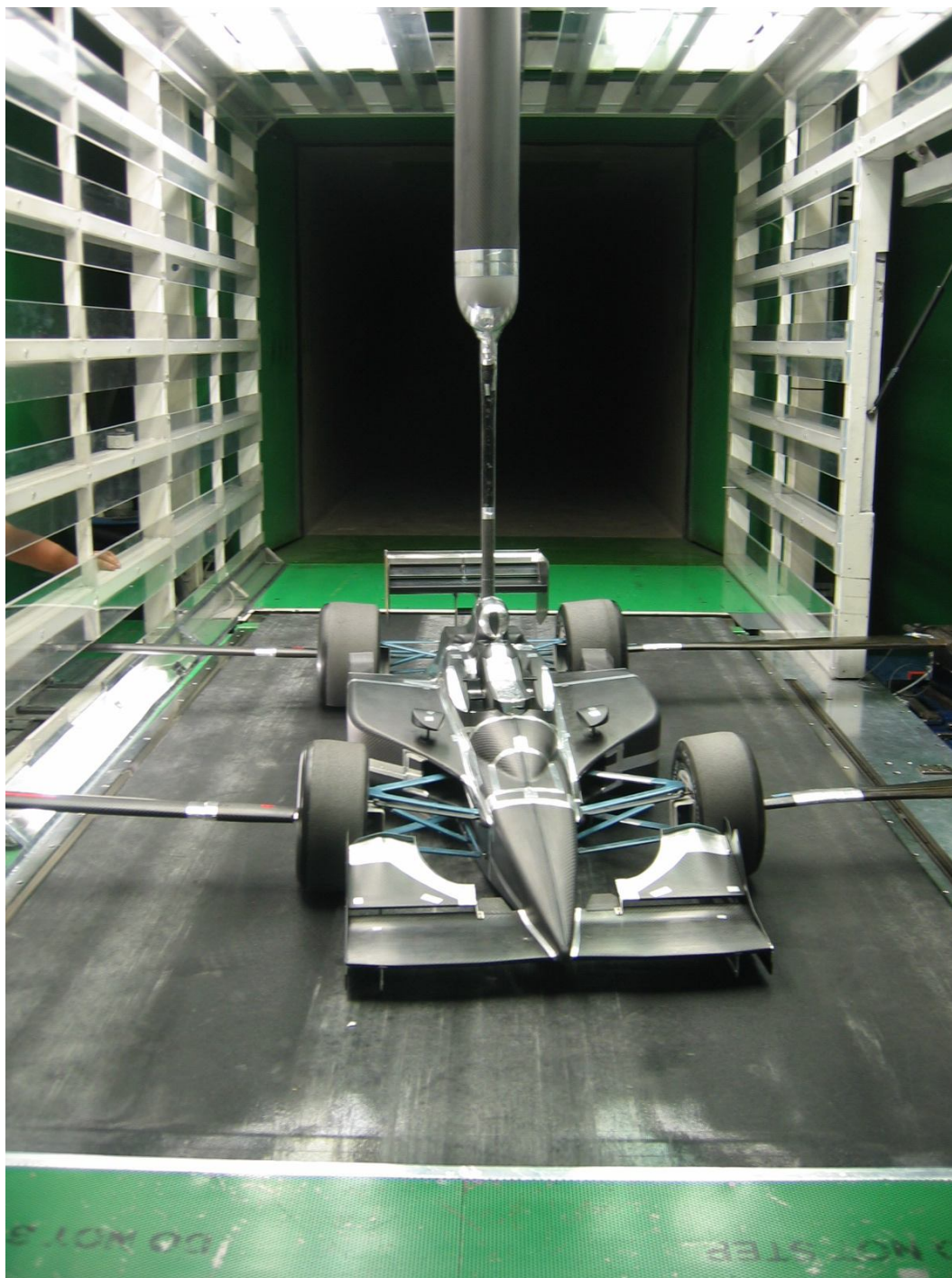


Figure 2 - Sting e bracci ruota (configurazione wheels off)

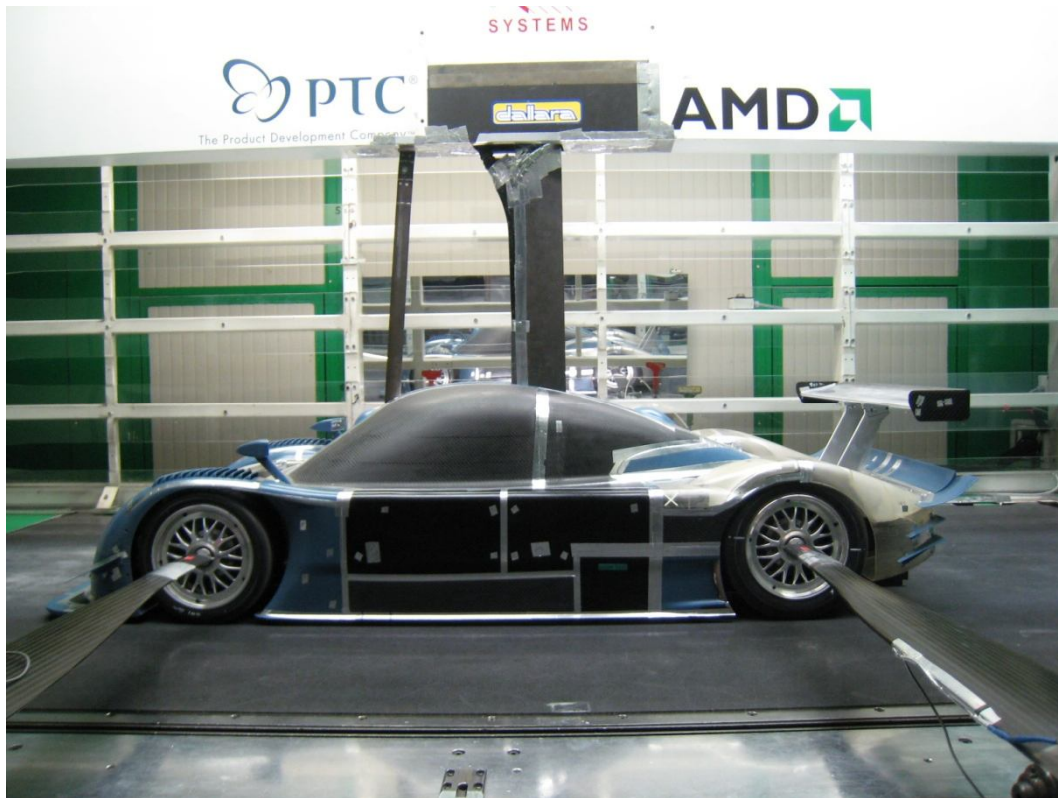


Figure 3 - Sting e bracci ruota (configurazione wheels off)

## 2.2 Correlazione flusso libero e galleria del vento

Per tutti i motivi descritti al paragrafo precedente, si può facilmente capire che anche gli impianti di prova più sofisticati presentano problematiche ed approssimazioni, a seguito del quale il flusso attorno al corpo risulta differente rispetto alla condizione reale.

Il presente lavoro si occupa di investigare a fondo queste differenze, quantificarle e capirne l'entità, chiarendo la correlazione fra la condizione di flusso libero e flusso in galleria del vento.

Nasce quindi la necessità di disporre di un corpo di calibrazione, ovvero un corpo caratteristico di riferimento dalla geometria semplice, ma capace di cogliere le caratteristiche

aerodinamiche salienti dei modelli generalmente impiegati in galleria del vento.

### 2.3 Corpo di calibrazione

I corpi di calibrazione normalmente utilizzati in campo automobilistico presentano caratteristiche tipiche del corpo tozzo (Figura 4 - Ahmed Body), con notevole resistenza e nessuna deportanza, caratteristiche verosimili per un'automobile di produzione in serie, ma decisamente inadeguate ai veicoli destinati alle competizioni sportive.

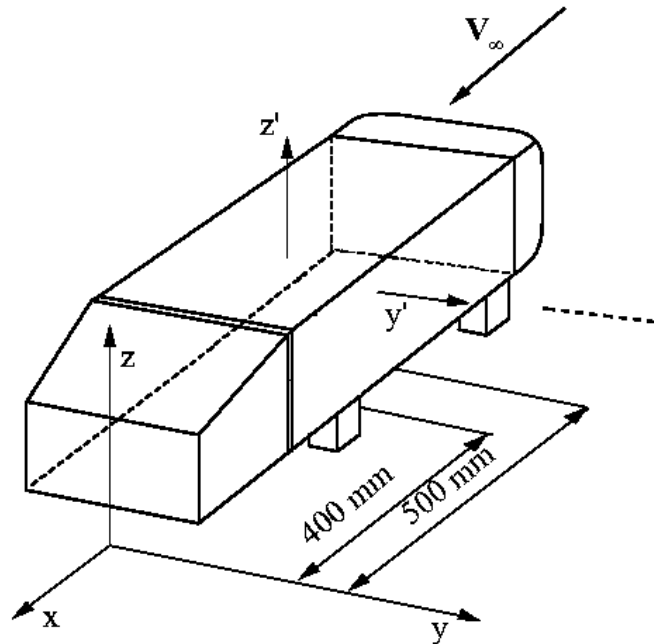
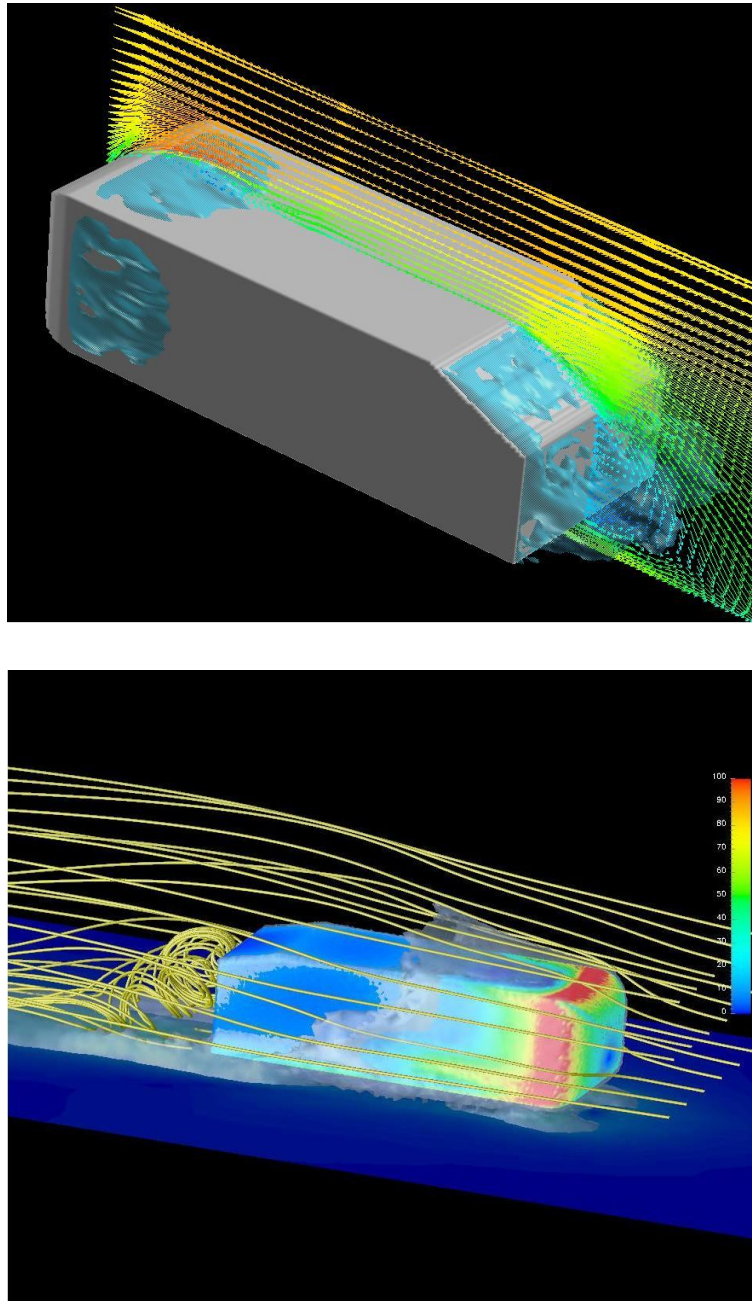


Figure 4 - Ahmed Body

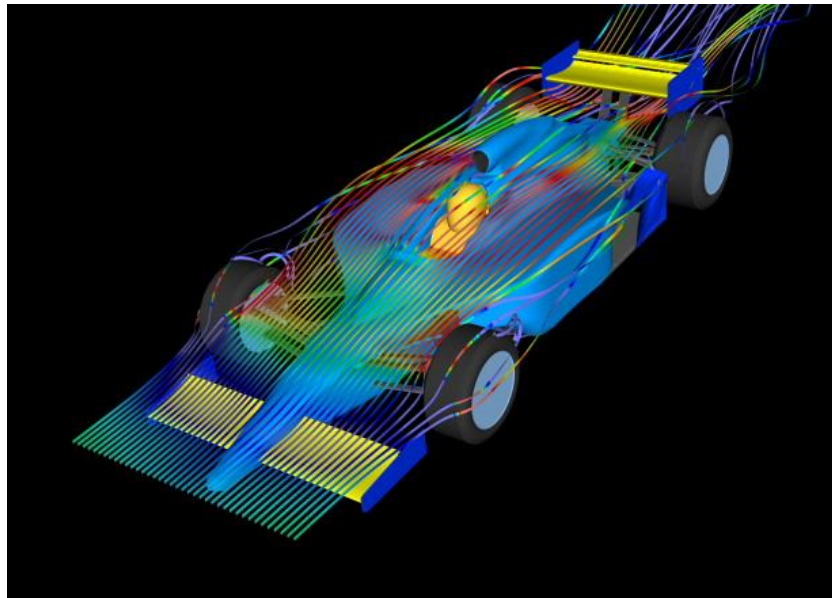




**Figure 5 - Simulazioni Ahmed body**

Come mostrato da numerose simulazioni (Figura 5 – Simulazioni Ahmed body) ciò è dovuto alla scia di notevole dimensioni e alla inefficiente interazione del fondo col suolo, situazione estremamente differente dal caso delle vetture da corsa e in particolar modo i formula, in cui la scia è il risultato di molteplici strutture vorticosi sviluppate dal corpo vettura e in cui l'effetto suolo

fornisce una parte notevole della deportanza totale agente sul veicolo (Figura 6 – Simulazione IRL - Formula Indy). Come si può osservare la forma e il tipo di flusso sviluppato sono completamente differenti.



**Figure 6 - Simulazione IRL - Formula Indy**

Al fine di avere un corpo di calibrazione che caratterizzi al meglio i tipi di modelli utilizzati normalmente in galleria del vento, si sceglie di realizzarlo specificatamente, così da poter disporre di un corpo semplice e al tempo stesso caratteristico.

## 2.4 Analisi al CFD

Per valutare le differenze fra le due distinte condizioni di flusso libero e flusso in galleria del vento, saranno effettuate delle analisi alla fluidodinamica computazionale del corpo di calibrazione evidenziando gli aspetti peculiari di un caso rispetto all'altro.

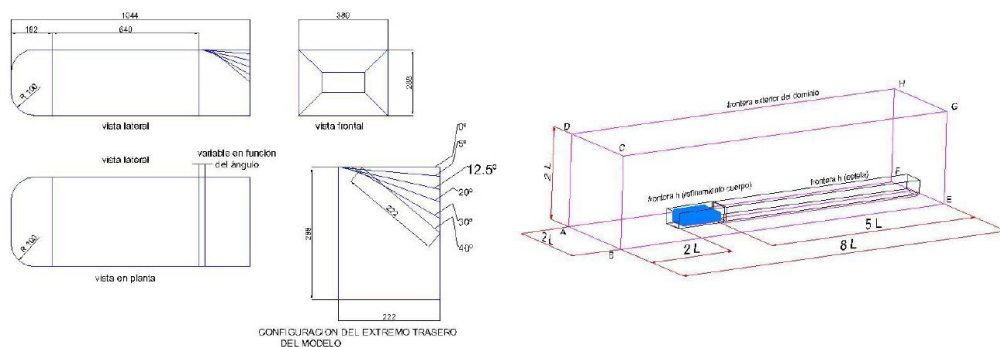
## Analisi al CFD

Tale analisi dovrà evidenziare il campo di pressione attorno al corpo di calibrazione nei due distinti casi, nonché investigare effetti e interazioni con le strutture di supporto nel caso di flusso in galleria del vento.



## Corpo di calibrazione

Il corpo di calibrazione più studiato in assoluto in ambito automotive è sicuramente l'Ahmed body (Figura 7 – Ahmed studies), su cui sono stati sviluppati studi di ogni tipo come studi di turbolenza, ottimizzazioni della scia e resistenza, nonché interazione fra serie di questi corpi.



### Figure 7 - Ahmed body studies

## Corpo di calibrazione

L'Ahmed body è un corpo di calibrazione perfetto per il settore auto motive stradale, ma risulta profondamente inadeguato per quanto riguarda il ramo delle competizioni sportive, in cui gli autoveicoli presentano caratteristiche completamente diverse.

Vetture come le formula, i turismo, gli sport, o i prototipi presentano una profonda interazione del fondo col suolo, grazie a cui si sviluppa una notevole percentuale del carico aerodinamico agente sul veicolo e come si può dedurre una estrema sensibilità alla posizione relativa, inoltre l'efficienza e il coefficiente di resistenza di questi corpi sono di entità completamente diversa.

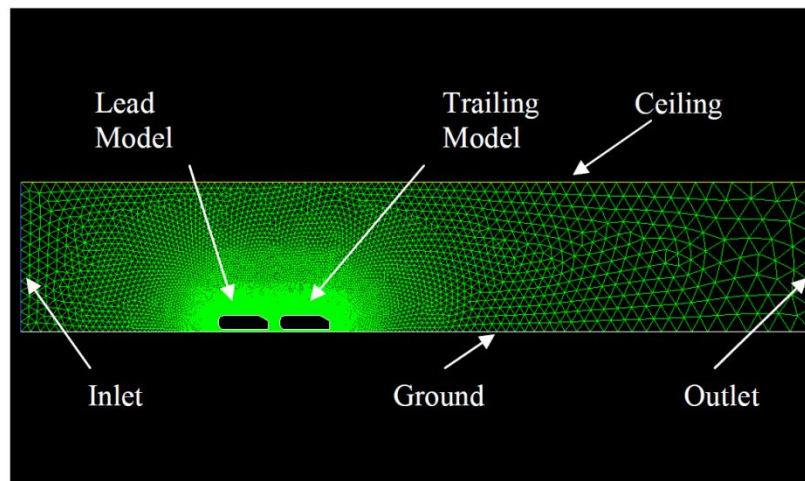


Figure 8 - Ahmed series

Come si può osservare (Figura 8 – Ahmed series) un'interessante studio rappresentante gli effetti di scia fra una serie di Ahmed body è stato sviluppato in galleria del vento con suolo fisso, ritenendo giustamente accettabile l'approssimazione di velocità relativa fra fluido e suolo diversa da zero.

Per evitare le notevoli incongruenze a cui porterebbe l'impiego di un Ahmed body come corpo noto di riferimento, si sceglie di realizzarlo appositamente per l'impiego specifico in esame. Tale corpo deve essere caratterizzato da un fondo piatto che lavori in condizioni di effetto suolo, deve essere deportante con un ragionevole bilanciamento fra carico agente sulla parte anteriore o sulla parte posteriore e sensibile alle variazioni della distanza dal suolo.

### 3.1 Artemio

Dalle premesse elencate nell'introduzione è nato Artemio (Figura 9 – Artemio), un corpo di calibrazione adatto al mondo delle competizioni automobilistiche.

Allo scopo di garantire le caratteristiche tipiche delle automobili sportive per la geometria esterna si è tratto ispirazione da alcune di esse, come si può osservare nelle immagini sottostanti di tipiche vetture a ruote coperte (Figura 10 – Grand-Am e DTM).

Artemio

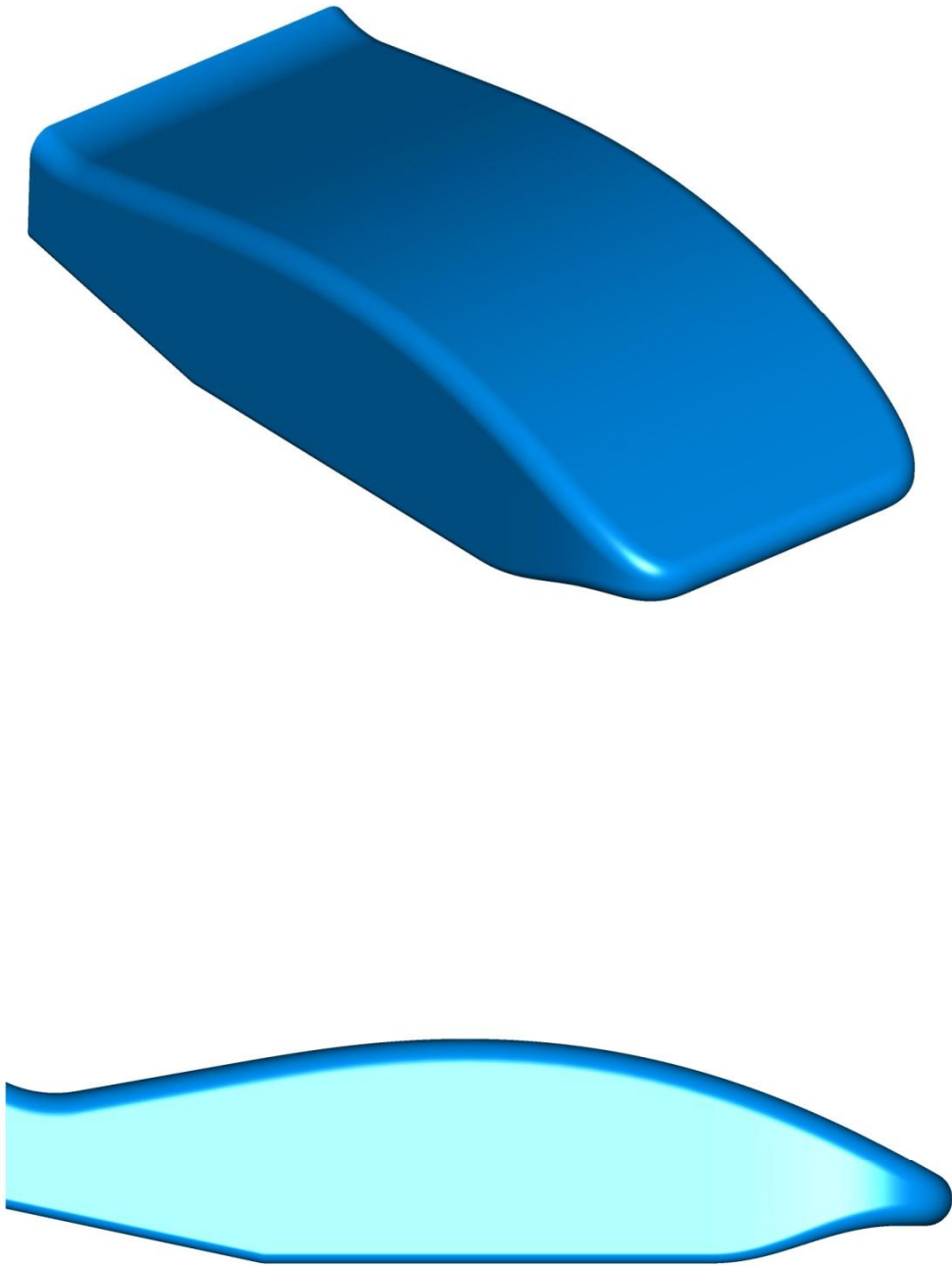


Figure 9 - Artemio



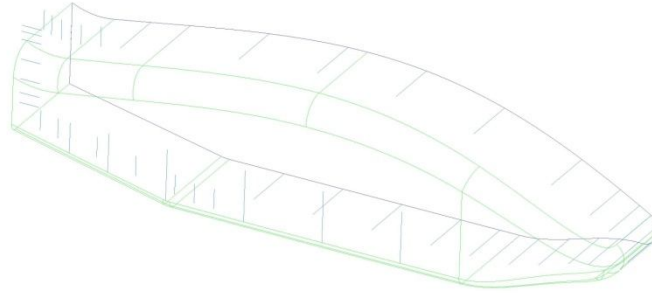
**Figure 10 - GrandAm e DTM**

Le prime semplificazioni fatte rispetto ai modelli reali hanno riguardato le ruote ed i flussi interni, entrambi eliminati per ottenere un flusso il più pulito possibile, mentre non sono state inserite ali per non introdurre nel sistema elementi estremamente sensibili alle condizioni di prova, problema che non sussiste per le analisi CFD, ma che è

molto sentito per quanto riguarda le prove sperimentali in galleria del vento a cui tale modello sarà destinato; infatti variazioni di pochi decimi di grado nell'angolo di incidenza possono portare a significative differenze nel carico verticale sviluppato dall'ala.

Il principale elemento assolutamente immancabile in un corpo di calibrazione destinato al settore auto motive sportivo è il fondo piatto, preceduto da uno diffusore anteriore per incrementare il flusso di massa nella parte inferiore del veicolo e a cui segue un ampio diffusore posteriore per incrementare la deportanza sviluppata dal corpo vettura. La parte superiore è costituita dalla zona anteriore in compressione, dalla zona posteriore in depressione, quindi portante col risultato di ridurre il carico verticale totale, ma decisamente caratteristica, a cui segue uno spoiler anch'esso molto caratteristico con cui in parte si annulla la portanza sviluppata nella zona superiore in depressione.

Per valutare i valori di pressione in vari punti del modello, al fine di individuare eventuali distacchi e conoscere la distribuzione di pressione sul fondo, la parte superiore ed inferiore di Artemio sono dotate di 92 fori (Figura 11 – Prese di pressione), collegati a degli scanner PSI capaci di convertire la pressione rilevata in voltaggi elettrici inviati al computer di acquisizione dati.



**Figure 11 - Prese di pressione**

### **3.2 Strumenti di misura: le bilance**

La bilancia è il principale strumento impiegato in galleria del vento, tramite cui sono misurate le forze agenti sul modello nei tre assi coordinati con la massima precisione, mediante 7 celle di carico disposte 4 verticalmente, 1 longitudinalmente e 2 trasversalmente (Figura 12 – Schema assemblaggio bilancia). Ogni cella di carico è costituita da un elemento metallico strutturale, attraverso cui passa corrente elettrica a basso voltaggio, sfrutta la proprietà fisica secondo cui l'impedenza varia in funzione della tensione meccanica applicata e



quindi a parità di intensità di corrente anche la differenza di potenziale.

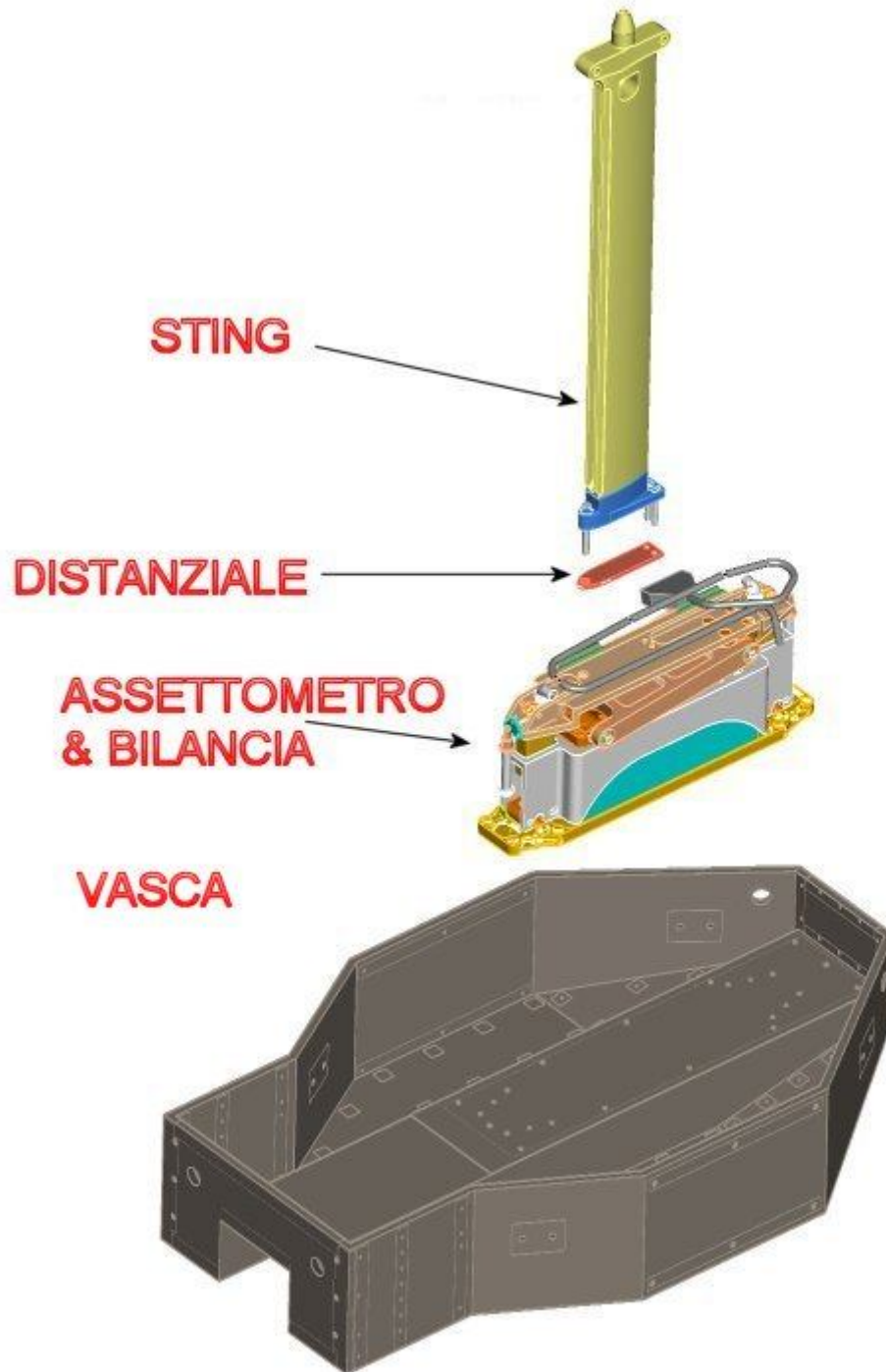


Figure 12 – Schema assemblaggio bilancia



### Capitolo 3 - Corpo di calibrazione

La precisione garantita è di livello molto alto se si pensa che applicando voltaggi dell'ordine di 7 volts, la sensibilità della cella di carico arriva ai centesimi di millivolt (Figura 13 – Bilancia).

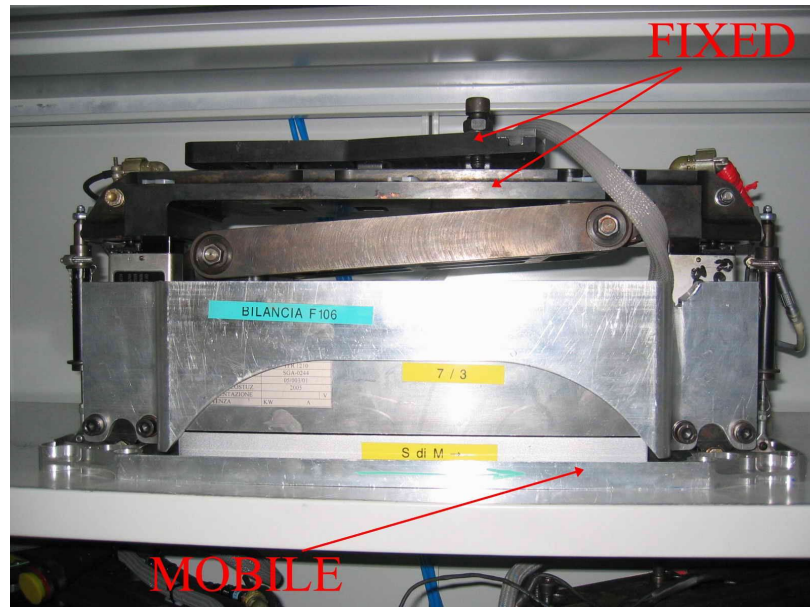


Figure 13 - Bilancia

La disposizione delle 4 celle di carico verticali ai rispettivi angoli consente di rilevare il carico verticale totale, il carico verticale agente sulla parte anteriore e posteriore, così da poter valutare il bilanciamento secondo un opportuno riferimento, che normalmente sono gli assi ruota anteriore e posteriore (Figura 14 - Struttura interna bilancia).

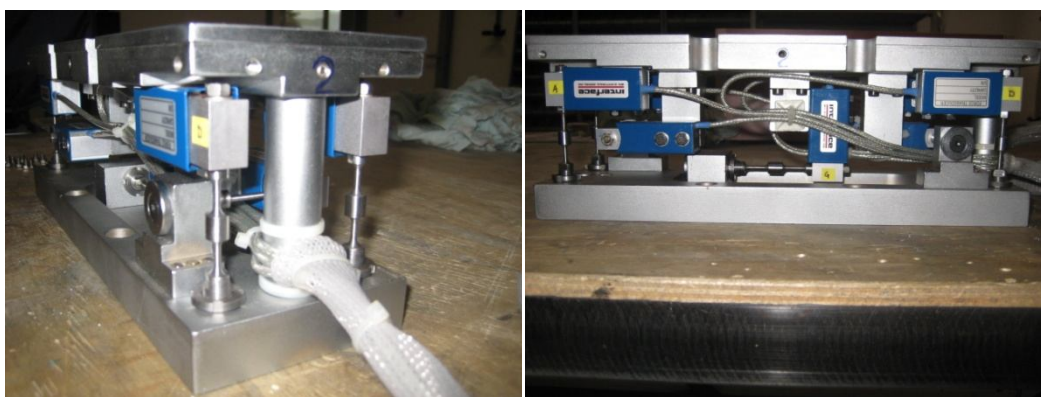


Figure 14 - Struttura interna bilancia

### 3.3 Struttura interna ed esterna

La parte interna è costituita dal principale elemento portante, una vasca in acciaio saldato dentro cui viene alloggiata la bilancia vincolata alla struttura di supporto della galleria lo STING, a cui sono vincolate quattro traversine a completare il necessario supporto per il guscio esterno.

La parte esterna allo scopo di garantire la massima rigidità e longevità presentando notevole leggerezza è realizzata in fibra di carbonio, nei due componenti di parte superiore ed inferiore. Inoltre considerato uno degli impieghi futuri di Artemio, ovvero essere impiegato come riferimento per analisi fluidodinamiche computazionali con metodi di turbolenza RNG e per le Large Eddy Simulation, si realizza la parte terminale modulare prevedendo la possibilità di applicare altre 3 distinte geometrie, di cui una a spigolo e due con raccordi differenti (Figura 15 – Parte terminale modulare).

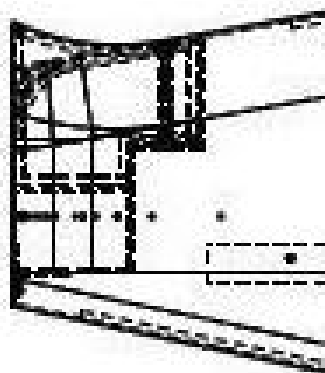


Figure 15 - Parte terminale modulare

Per Artemio è stata concepita una vasca universale tale da essere compatibile con tutti i tipi di bilance utilizzati in Dallara, per garantire la massima versatilità di impiego possibile.

### **3.4 Movimentazione**

Ogni prova in galleria del vento consiste nella simulazione di numerosi assetti differenti, variabili da una a numerose decine in cui variano l'altezza da terra del fondo in corrispondenza degli assi ruota anteriore e posteriore, il rollio, la sterzata e l'imbardata. Tale movimentazione è automatizzata e la prova nel suo complesso può richiedere da dieci fino a quaranta minuti circa.

E' necessario notare che su Artemio mancano i riferimenti per gli assetti in quanto non vi sono ruote, per cui si definiscono convenzionalmente gli assi ruota secondo le medesime proporzioni di alcune vetture di classe sport, prendendo come riferimento il centro bilancia. Questa soluzione permette di avere un riscontro consistente con i modelli normalmente impiegati in galleria del vento.



# 4

## Analisi CFD

---

La fluidodinamica computazionale è uno dei più potenti ed utili strumenti per predire il comportamento di un flusso esterno su di un automobile, il cui impiego è diventato fin dalla sua comparsa fondamentale ed utilizzato in simbiosi con la galleria del vento.

Lo studio attuale sugli effetti di interazione fra corpo e galleria del vento è eseguito al CFD e si divide in quattro fasi diverse. Inizialmente il corpo è modellato al ProE e il file è salvato come \*.igs, dopodiché i modelli sono importati in ANSA dove si genera la mesh superficiale e si esporta il file \*.msh in Tgrid dove il dominio di prova è creato attorno ad essi, meshato e assegnate le condizioni al contorno. Il file è salvato come \*.msh, esportato in FLUENT in cui è eseguita l'analisi CFD per predire il comportamento aerodinamico del corpo con le particolari condizioni del caso.

Il processo è ripetuto per le varie condizioni al contorno differenti di corpo in flusso libero e corpo in galleria del vento, utilizzando i generatori di griglia superficiale e volumetrica commerciali ANSA e Tgrid, seguito dall'analisi CFD tramite il simulatore disponibile in commercio FLUENT 6.3.26.

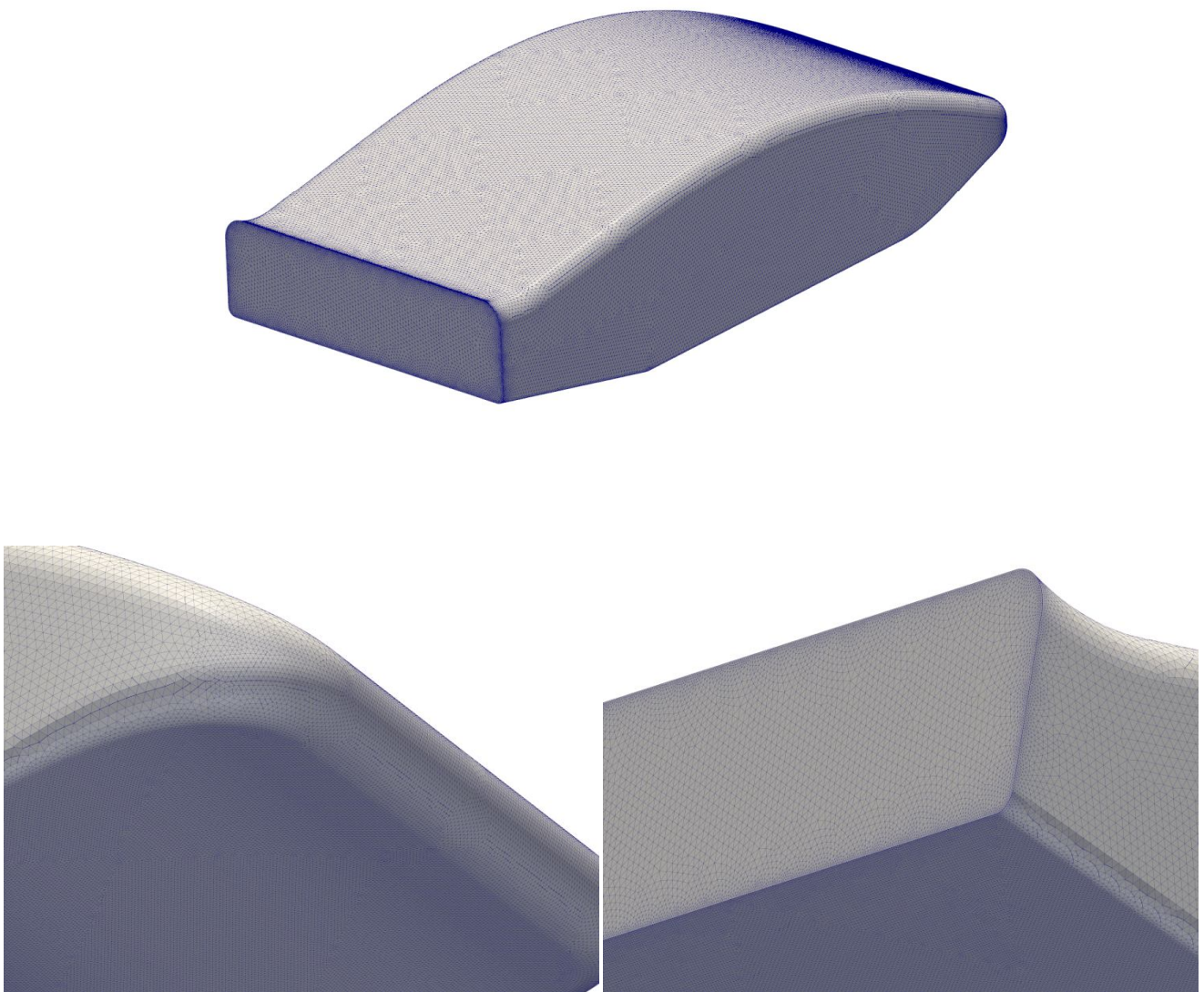
### 4.1 Mesh superficiale di Artemio

Questa sezione presenta l'utilizzo del generatore di griglia superficiale ANSA, per sviluppare mesh della superficie del corpo di calibrazione Artemio. ANSA è un unico, integrato pre-processore per l'analisi CFD, ha capacità di modellazione solida ACIS, che consentono all'utente di importare direttamente file di modelli solidi da CAD. Ha la capacità di leggere formati IGES CAD, ovvero solo con le informazioni dei vertici e delle superfici, inoltre ANSA consente all'utente di pulire e modificare la geometria a fini di generazione della griglia (Figura 16 – Mesh superficiale Artemio - Flusso libero). Nei casi di flusso in galleria è necessario modellare anche le superfici di galleria (Figura 17 - Mesh superficiale Artemio - Flusso in galleria del vento).

La modellazione superficiale del corpo è estremamente importante, in quanto la prima parte della griglia volumetrica sarà formata da prismi estrusi dagli elementi triangolari con cui è stata discretizzata la superficie, inoltre nel settore auto motive diventa molto importante modellare correttamente anche il suolo per cui valgono i medesimi concetti espressi finora (Figura 18 – Mesh superficiale di suolo) e ovviamente le pareti di galleria (Figura 19 –

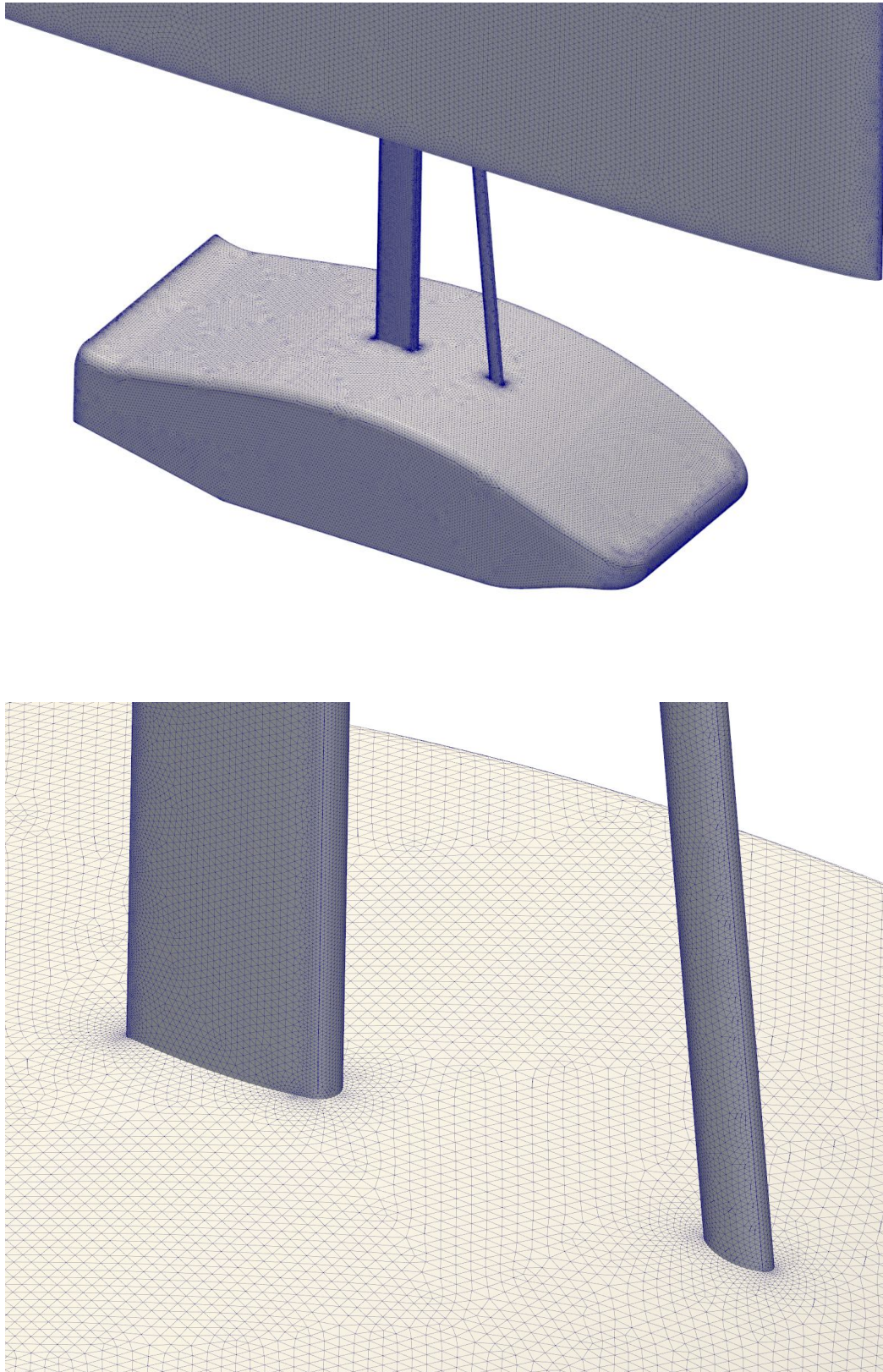


Mesh superficiale di galleria). Per Artemio la modellazione della superficie è stata effettuata utilizzando elementi triangolari.



**Figure 16 - Mesh superficiale di Artemio – Flusso libero**

## Mesh superficiale di artemio



**Figure 17 - Mesh superficiale di Artemio - Flusso in galleria del vento**



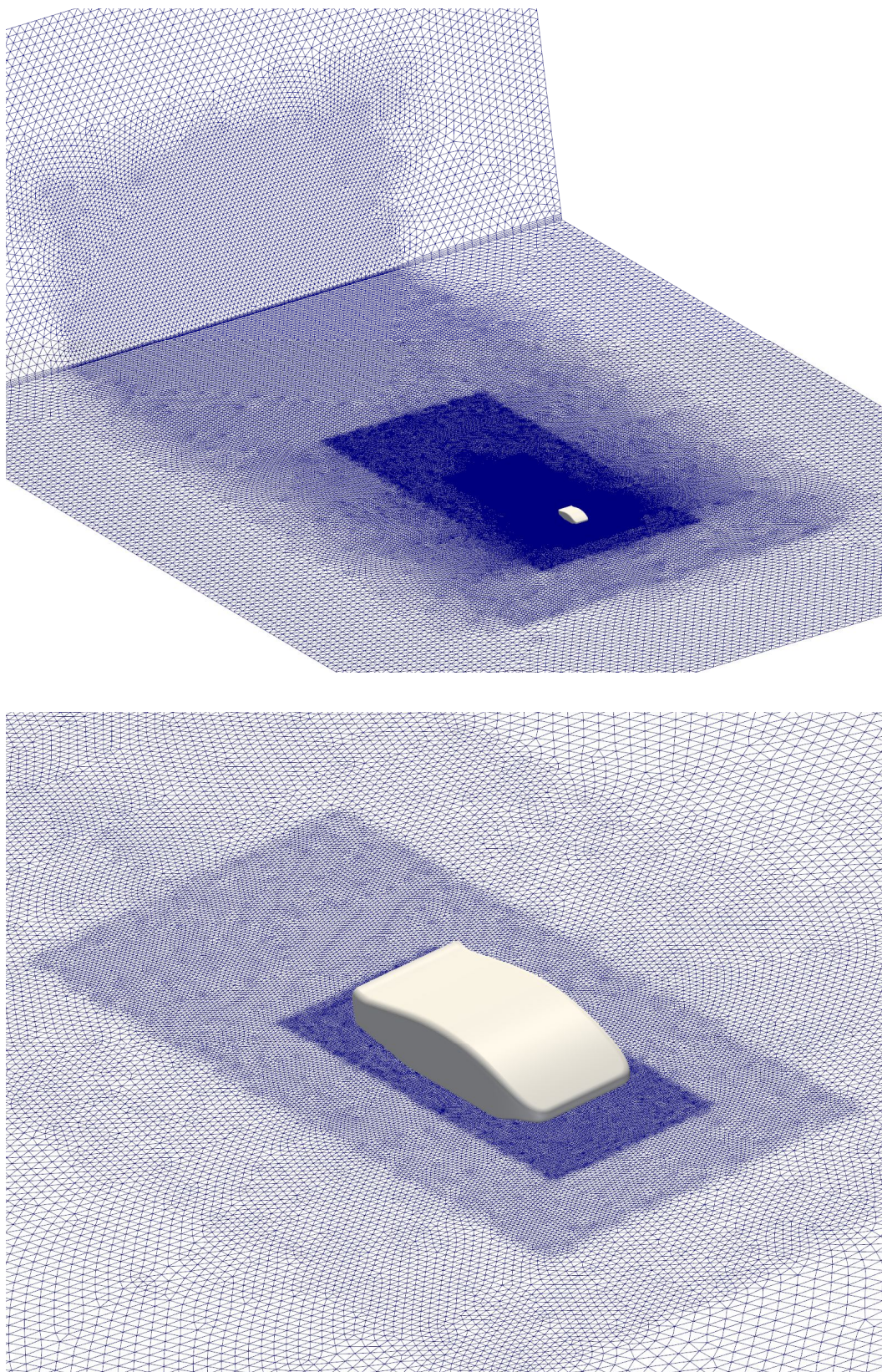


Figure 18 – Mesh superficiale di suolo



## Mesh superficiale di artemio

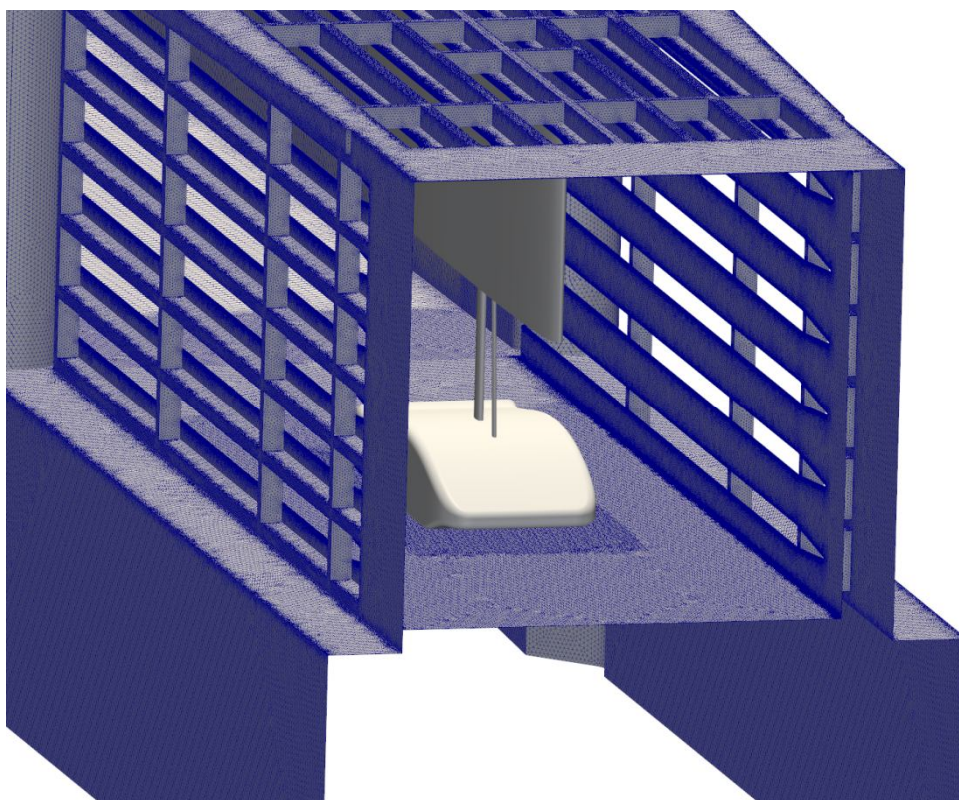
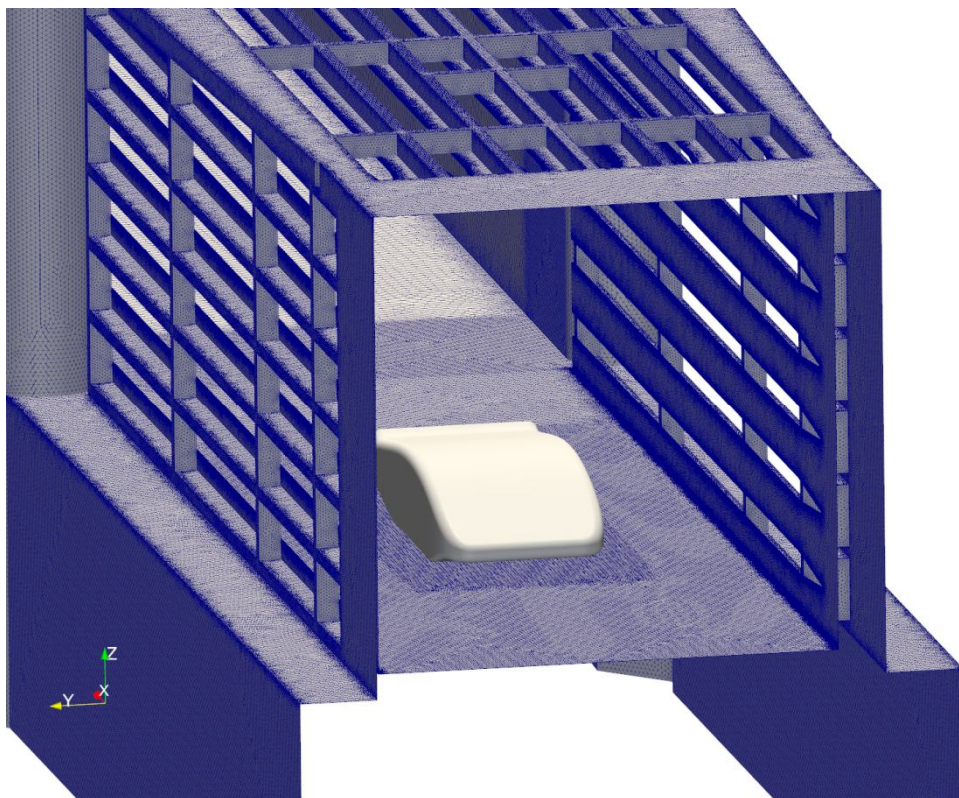


Figure 19 - Mesh superficiale di galleria

## 4.2 Scelta della griglia

In Tgrid è possibile utilizzare griglie composte da celle triangolari, quadrangolari o combinazioni di esse in 2D e tetraedrico, esaedrico, prismatiche, a cuneo o combinazioni di esse in 3D. La scelta del tipo di griglia dipende dall'applicazione peculiare in esame e influisce su vari parametri:

- Tempo di preparazione.
- Risorse computazionali.
- Diffusione numerica (post processing).

Per chiarire l'effetto del tipo di griglia, questi parametri sono analizzati nel dettaglio.

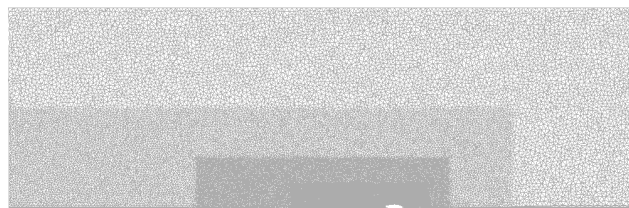
Le size function permettono di controllare le dimensioni della griglia per angoli ed elementi di superficie e volume. Le size function sono simili negli strati limite in cui controllano le caratteristiche della mesh in prossimità delle entità a cui sono attaccati, mentre sono differenti nel modo in cui sono definite e nel modo in cui controllano la mesh. Gli strati limite prescrivono specifici schemi di mesh e di dimensioni degli elementi di superficie o volume, tramite le seguenti proprietà:

- Massima dimensione dello spigolo del singolo elemento di mesh.
- Angolo fra le normali per elementi adiacenti nella mesh.
- Numero di elementi della mesh impiegati fra due distinte entità geometriche.

## Scelta della griglia

Il comando “Create Size Function” crea una size function e la collega ad una specifica entità, permettendo di controllarne le dimensioni della griglia nella regione di prossimità. Nello specifico consentono di limitare la spaziatura fra i vari spigoli, o le dimensioni di ogni elemento di superficie o volume.

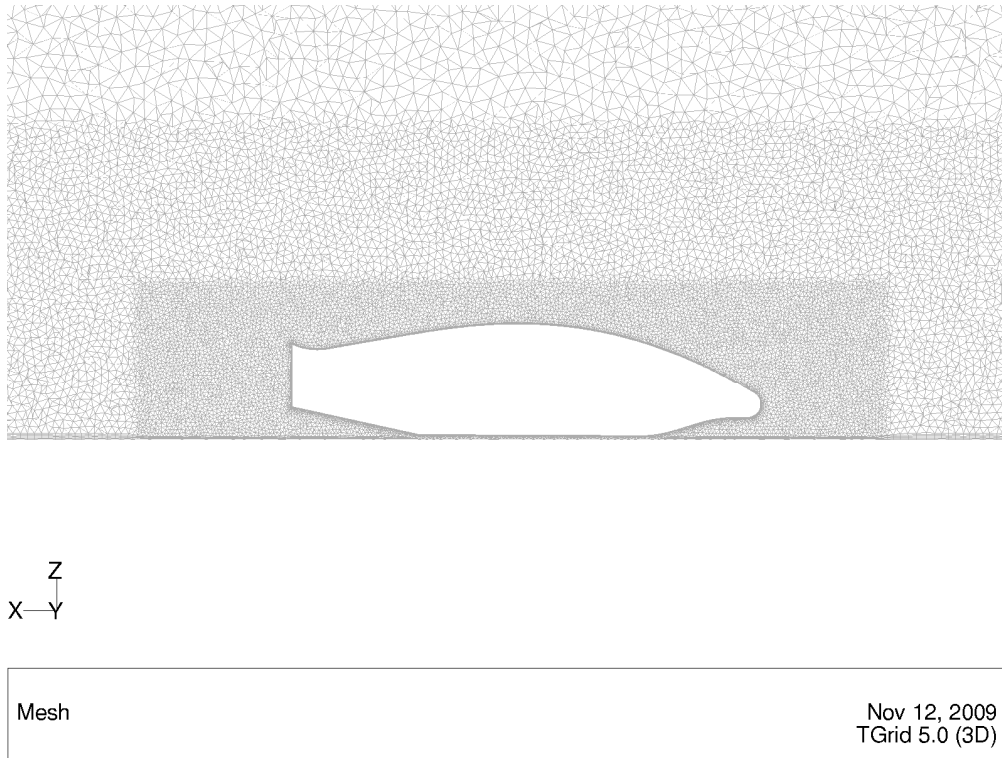
Un esempio degli effetti delle size function per lo studio attuale (Figura 20 – Mesh volumetrica Artemio), mostra l’effetto di una size function allegata al volume e definita rispetto alla superficie del modello. Se il volume è meshato usando elementi tetraedrici la size function limita le dimensioni dei bordi degli elementi in corrispondenza della superficie, col risultato che gli elementi tetraedrici nella regione che circonda la superficie di origine sono piccoli rispetto a quelli utilizzati per la maglia nel suo complesso ed aumentano di dimensione proporzionalmente alla distanza.



Z  
X—Y

Mesh

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)



**Figure 20 - Mesh volumetrica Artemio**

Per creare una size function alcune specifiche devono essere definite:

- Tipo.
- Entità.
- Parametri.

Il tipo specifico determina il tipo di algoritmo utilizzato dalla size function per controllare la dimensione degli spigoli delle maglie di ogni elemento. La specifica entità determina le entità geometriche che vengono utilizzate come fonte e gli enti di collegamento per le size function. I parametri di funzione permettono di definire le dimensioni esatte caratteristiche delle size function.



## **4.3 Generazione della griglia volumetrica tramite Tgrid**

Questa sezione presenta l'utilizzo del generatore di griglia Tgrid, per sviluppare mesh 2D e 3D per il corpo di calibrazione Artemio. Tgrid è un unico, integrato pre-processore per l'analisi CFD. Questo software può generare mesh per solutori FLUENT e permette all'utente di generare griglie in piramide strutturate e non strutturate a esaedro, tetraedro, prismi e assegnare le zone di confine alla griglia.

Diversi problemi CFD richiedono tipi di maglie diverse, per questo Tgrid fornisce all'utente le opzioni necessarie per queste applicazioni, come il meshing toolkit che consente di decomporre le geometrie per meshing esaedriche strutturate o eseguire meshing esaedriche automatizzate con il controllo di clustering. Assegnando domini diversi Tgrid è in grado di utilizzare elementi superficiali e volumetrici differenti interfacciandoli per ottenere la necessaria risoluzione.

## **4.4 Mesh di Artemio**

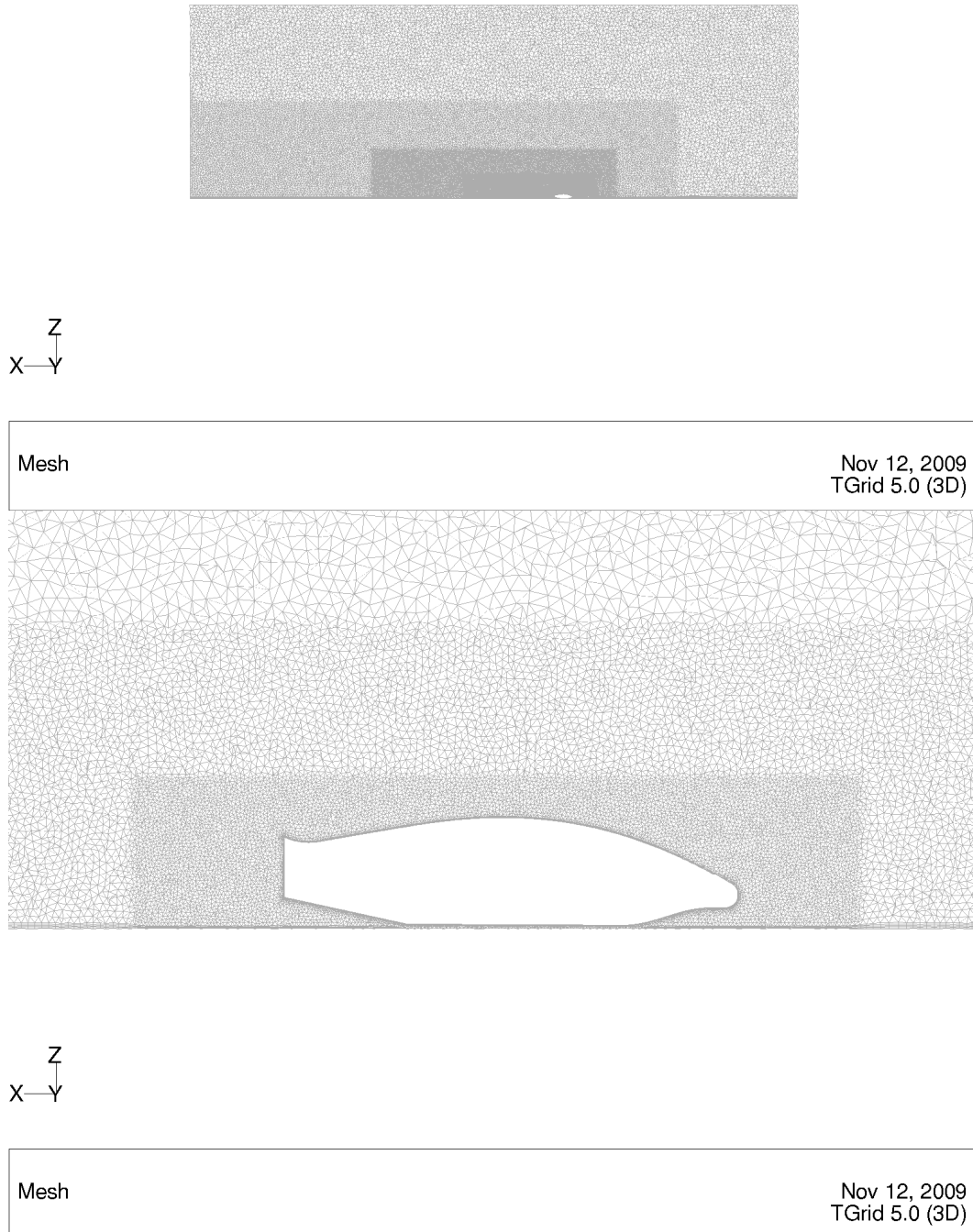
L'analisi CFD di Artemio è effettuata nelle varianti di flusso libero, flusso in galleria del vento e flusso in galleria senza strutture di supporto. Chiaramente il caso intermedio in cui si considera l'effetto delle pareti della galleria, ma non delle strutture di supporto non è fisicamente realizzabile, ma viene effettuato per investigare l'effetto dei singoli componenti dell'impianto sul tipo di flusso attorno al corpo

di calibrazione. Questo porta a dover effettuare la mesh per i tre casi in esame, ovviamente secondo i medesimi criteri.

### 4.4.1 Caso di flusso libero

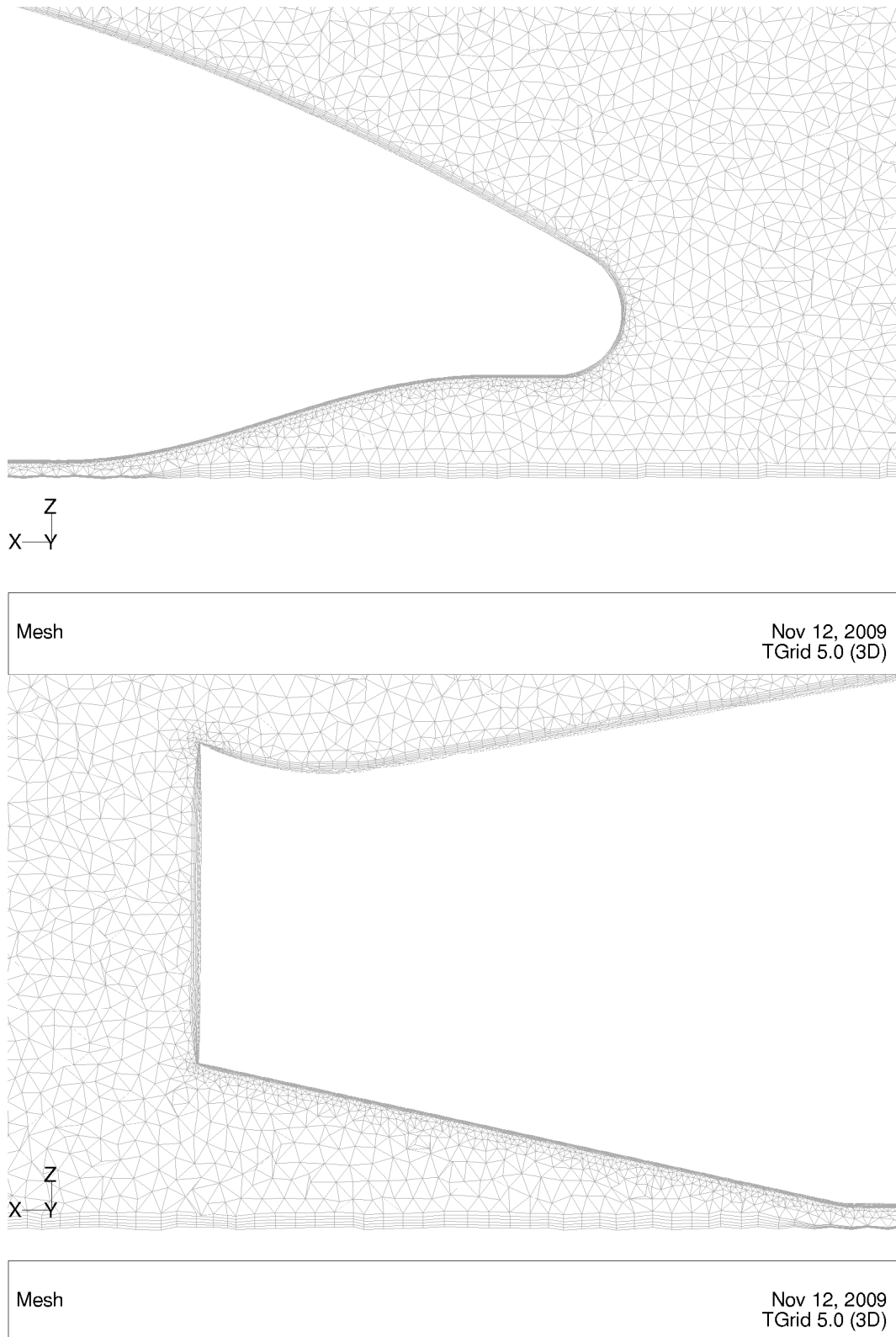
Il dominio per il corpo di calibrazione contiene un ingresso, un uscita, il suolo, le pareti laterali e un tetto, mentre il volume di flusso è a maglie in diversi tipi di griglia, al fine di ottenere i risultati della simulazione più accurati possibile e limitare il tempo computazionale utilizzando l'opzione size function. Si può osservare che Artemio e il suolo sono circondati da una finissima griglia, dal momento che questi settori risultano estremamente importante per la corretta rappresentazione delle strutture del flusso. Strati limite vengono accuratamente creati lungo le pareti del corpo di calibrazione per simulare le separazioni del flusso nella parte posteriore superiore e le due formazioni vorticosi in corrispondenza del diffusore posteriore, nonché del suolo. La parte più vicina al corpo è composta da elementi prismatici direttamente estrusi dalla mesh superficiale (Figura 22 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso libero), garantendo una geometria della mesh coerente con la geometria superficiale del corpo, come è stato fatto anche per il suolo, mentre il resto della griglia è tetraedrica e si applica a tutto il dominio (Figura 21 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso libero). Le posizioni dell'entrata e dell'uscita sono poste abbastanza lontano in modo che il flusso prima che raggiunga il modello e anche di seguito possano essere sviluppati completamente senza risentire del disturbo.

## Mesh di Artemio



**Figure 21 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso libero**

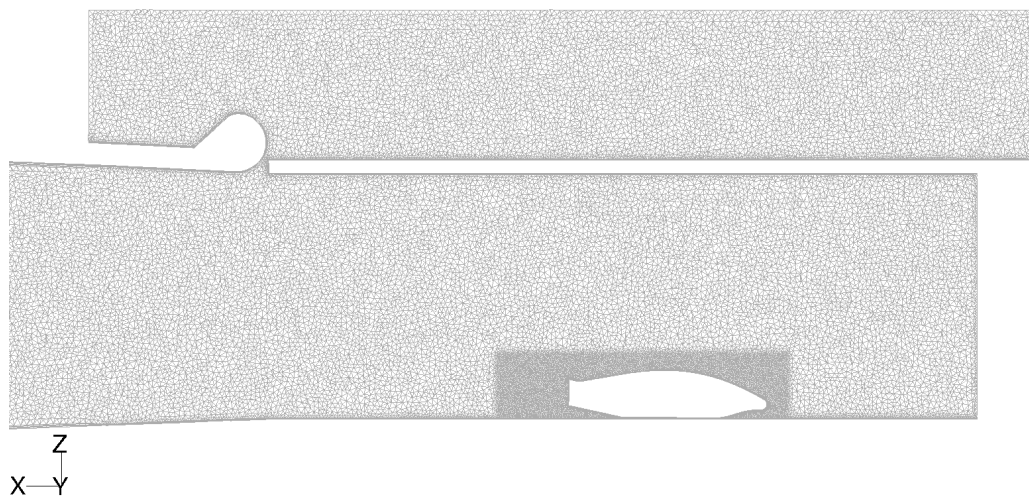




**Figure 22 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso libero**

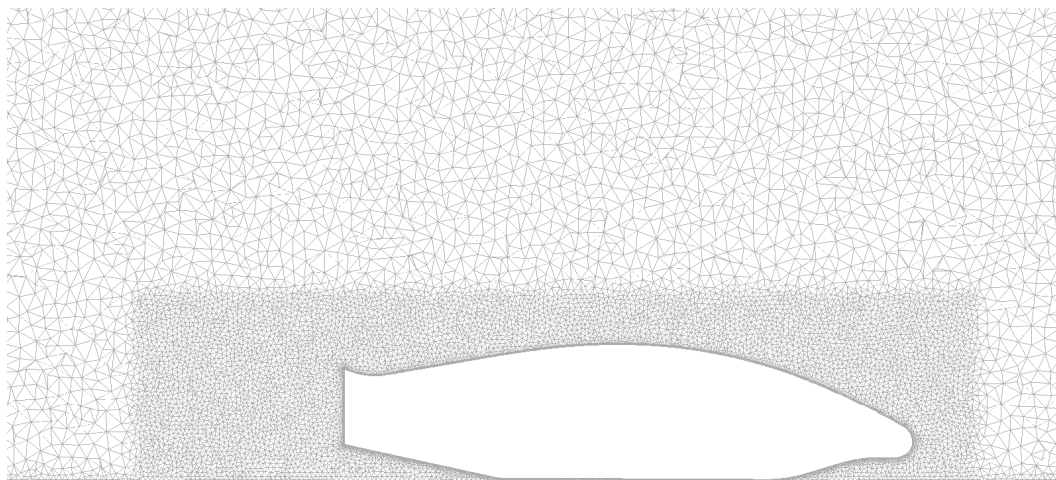
### 4.4.2 Caso di flusso in galleria del vento senza STING

Il dominio per il corpo di calibrazione contiene un ingresso, un uscita, il suolo mobile e all'esterno il suolo fisso, le pareti laterali fessurate e il tetto fessurato, mentre il volume di flusso è a maglie in diversi tipi di griglia, al fine di ottenere i risultati della simulazione più accurati possibile e limitare il tempo computazionale utilizzando l'opzione size function. Si può osservare che Artemio, il suolo, il tetto e le pareti sono circondati da una finissima griglia, dal momento che questi settori risultano estremamente importante per la corretta rappresentazione delle strutture del flusso. Strati limite vengono accuratamente creati lungo le pareti del corpo di calibrazione per simulare le separazioni del flusso nella parte posteriore superiore e le due formazioni vorticosi in corrispondenza del diffusore posteriore nonché del suolo, del tetto e delle pareti. La parte più vicina al corpo è composta da elementi prismatici direttamente estrusi dalla mesh superficiale (Figura 24 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso in galleria del vento senza STING), garantendo una geometria della mesh coerente con la geometria superficiale del corpo, come è stato fatto anche per il suolo, il tetto e le pareti, mentre il resto della griglia è tetraedrica e si applica a tutto il dominio (Figura 23 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso in galleria del vento senza STING). La posizioni dell'entrata è posta in corrispondenza dell'ingresso galleria e l'uscita è posta abbastanza lontano in modo che il flusso simulato sia fedele alla condizione reale.



Mesh  
Restrictions: y-range

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)



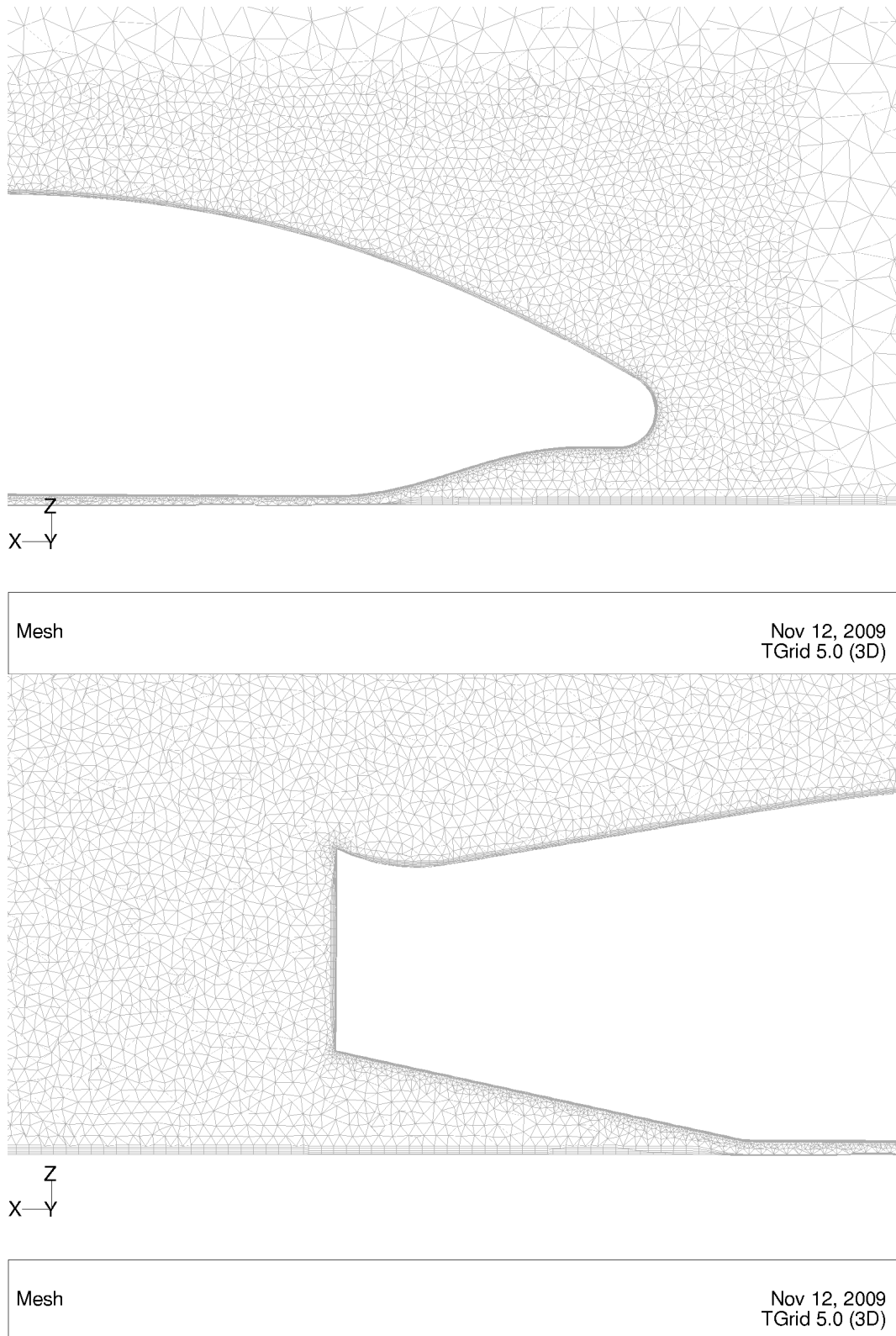
Z  
X—Y

Mesh

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)

**Figure 23 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso in galleria del vento senza STING**

## Mesh di Artemio



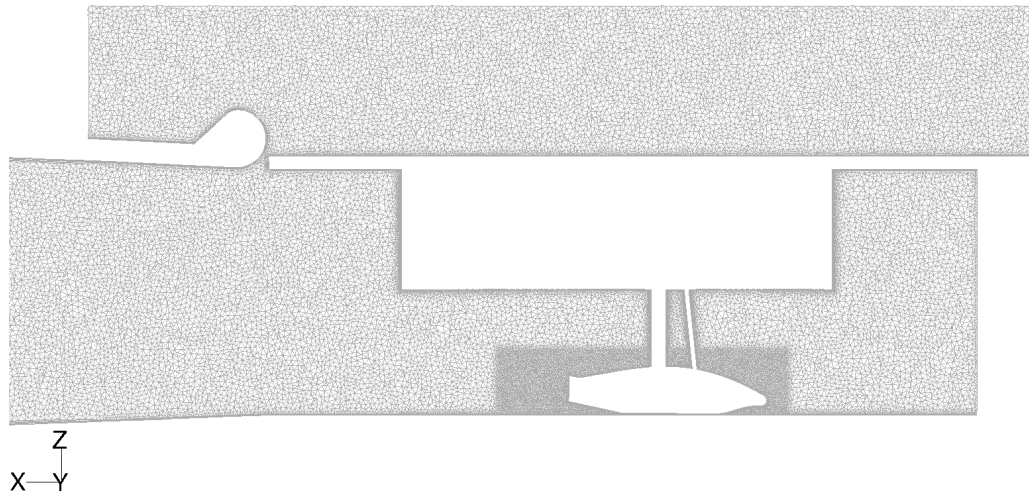
**Figure 24 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso in galleria del vento senza STING**

### 4.4.3 Caso di flusso in galleria del vento

In aggiunta al caso precedente sono presenti le strutture di supporto composte da STING e piastrone, circondati da una finissima griglia questi settori risultano al pari di quelli elencati precedentemente estremamente importanti per la corretta rappresentazione delle strutture del flusso. Strati limite vengono accuratamente creati lungo le pareti di queste strutture prestando notevole attenzione ai punti di connessione con il corpo di calibrazione e con le pareti di galleria, per simulare le strutture vorticosi sviluppate. La parte più vicina alle superfici è composta da elementi prismatici direttamente estrusi dalla mesh superficiale (Figura 26 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso in galleria del vento), garantendo una geometria della mesh coerente con la geometria superficiale del corpo, come è stato fatto anche per tutte le altre superfici, mentre il resto della griglia è tetraedrica e si applica a tutto il dominio (Figura 25 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso in galleria del vento). La posizioni dell'entrata è posta in corrispondenza dell'ingresso galleria e l'uscita è posta abbastanza lontano in modo che il flusso simulato sia fedele alla condizione reale.

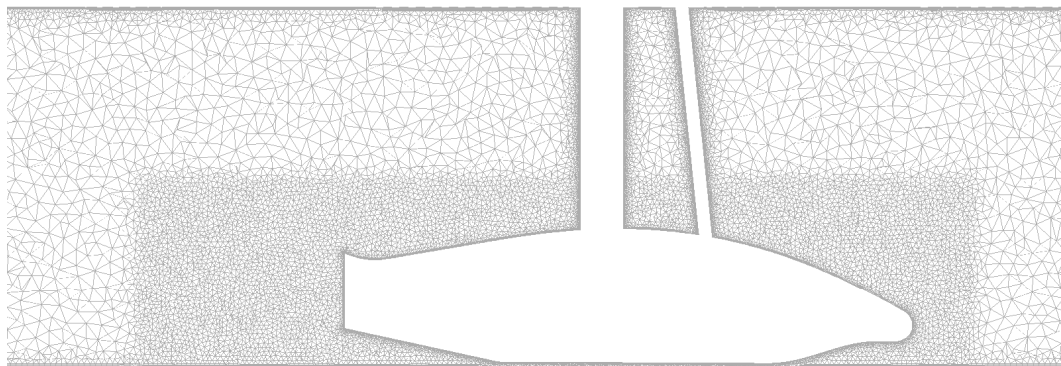


## Mesh di Artemio



Mesh  
Restrictions: y-range

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)



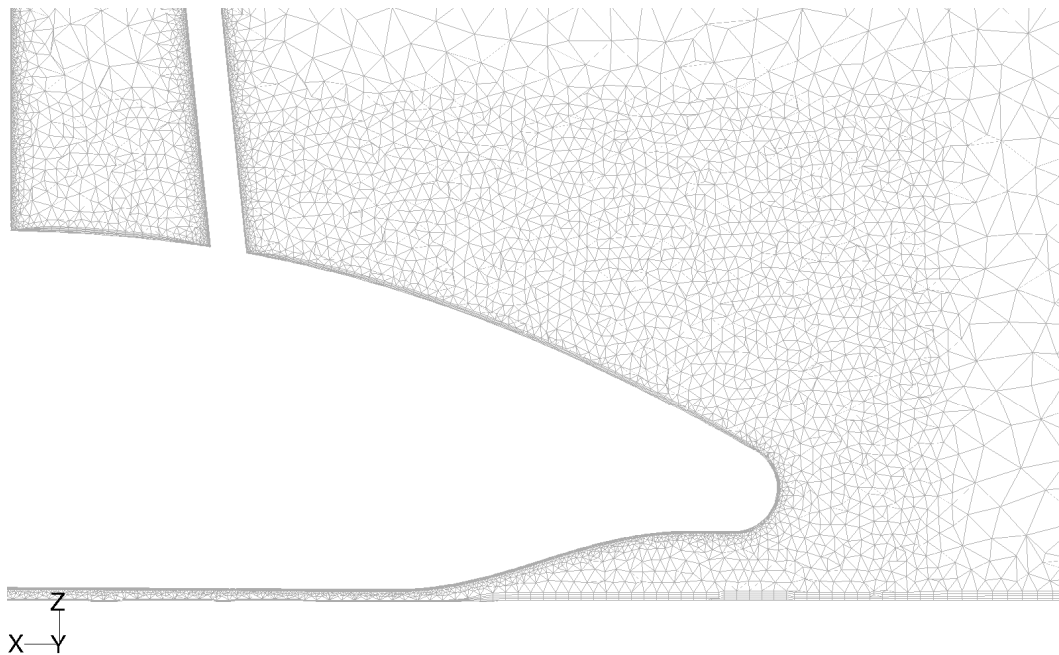
Z  
X—Y

Mesh  
Restrictions: y-range

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)

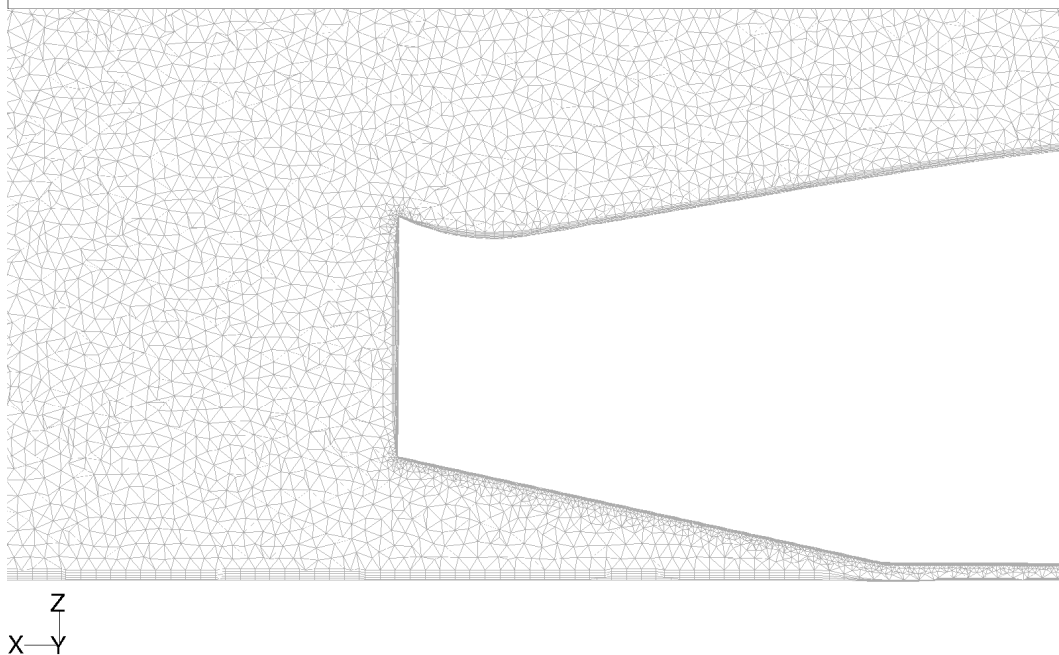
**Figure 25 - Mesh volumetrica Artemio - Flusso in galleria del vento**

## Capitolo 4 - Analisi CFD



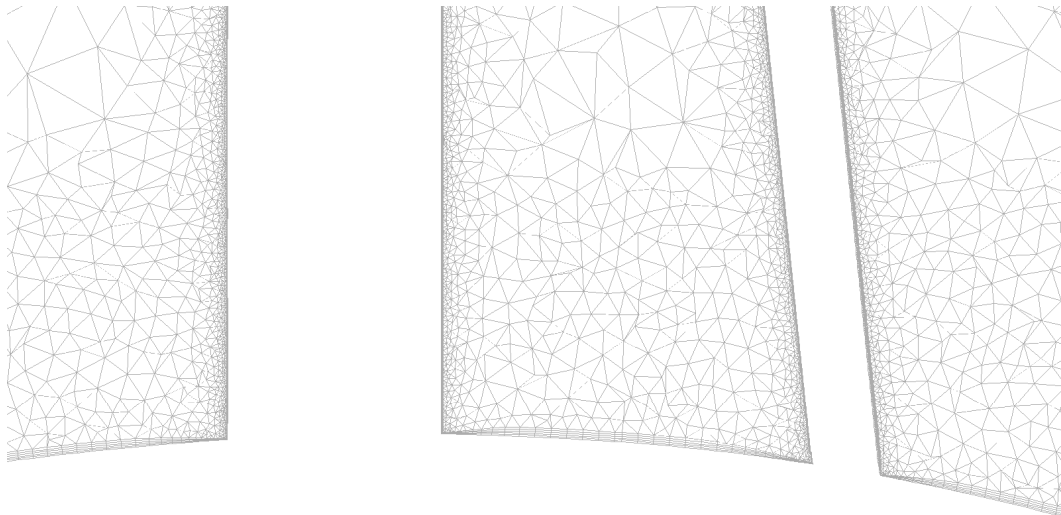
Mesh  
Restrictions: y-range

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)



Mesh  
Restrictions: y-range

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)



Mesh  
Restrictions: y-range

Nov 12, 2009  
TGrid 5.0 (3D)

**Figure 26 - Mesh volumetrica Artemio, dettagli - Flusso in galleria del vento**

## 4.5 Domini nello spazio di integrazione

L'assetto simulato è di 12 mm di altezza per il fittizio asse ruota anteriore e 15 mm per quello posteriore come distanza standard di base per tutti i test.

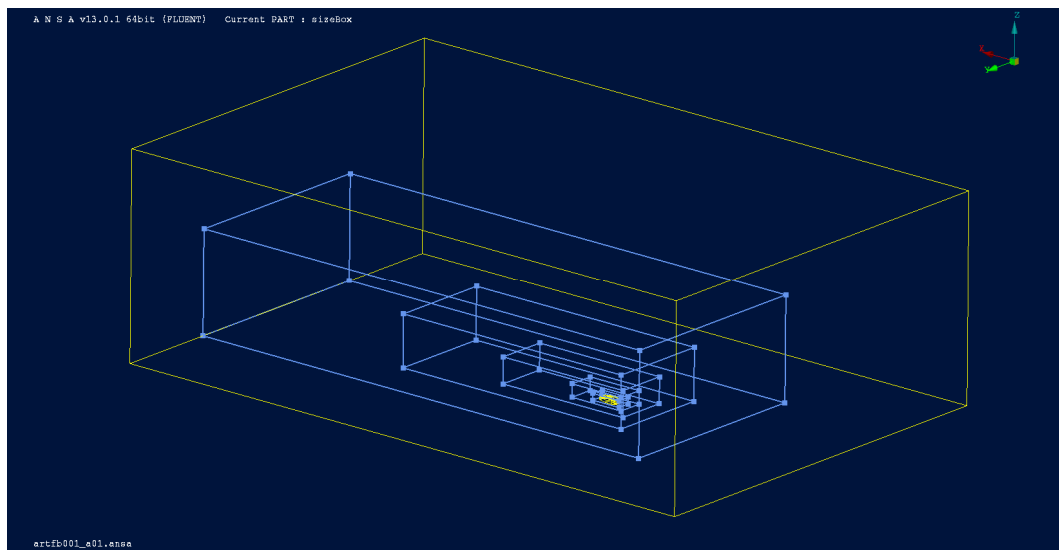
Per effettuare una mesh tridimensionale in Tgrid il modello è importato da un software CAD, per il caso in esame si crea un modello solido di Artemio con il software commerciale CAD ProE, successivamente salvato come file \*.igs, importato in ANSA per generare la griglia superficiale, salvato come file \*.msh, importato in Tgrid per generare la griglia volumetrica e salvato nuovamente come file \*.msh. Una tecnica di mesh standard non strutturata a base di celle



prismatiche direttamente estrusa dalla mesh superficiale è impiegata per adattarsi correttamente alla complessa geometria curvilinea del corpo tramite una size function, da cui si sviluppa una mesh standard non strutturata a base di celle tetraedriche, questo per raggiungere la necessaria risoluzione per cogliere tutto lo strato limite ed avere una predizione molto accurata.

### 4.5.1 Domini caso flusso libero

L'intero dominio è composto da 7 sottodomini per un totale di circa 28 milioni di celle nel caso di flusso libero (Figura 27 - Domino e sottodomini in caso di flusso libero) ed è sufficientemente grande da non condizionare i risultati.



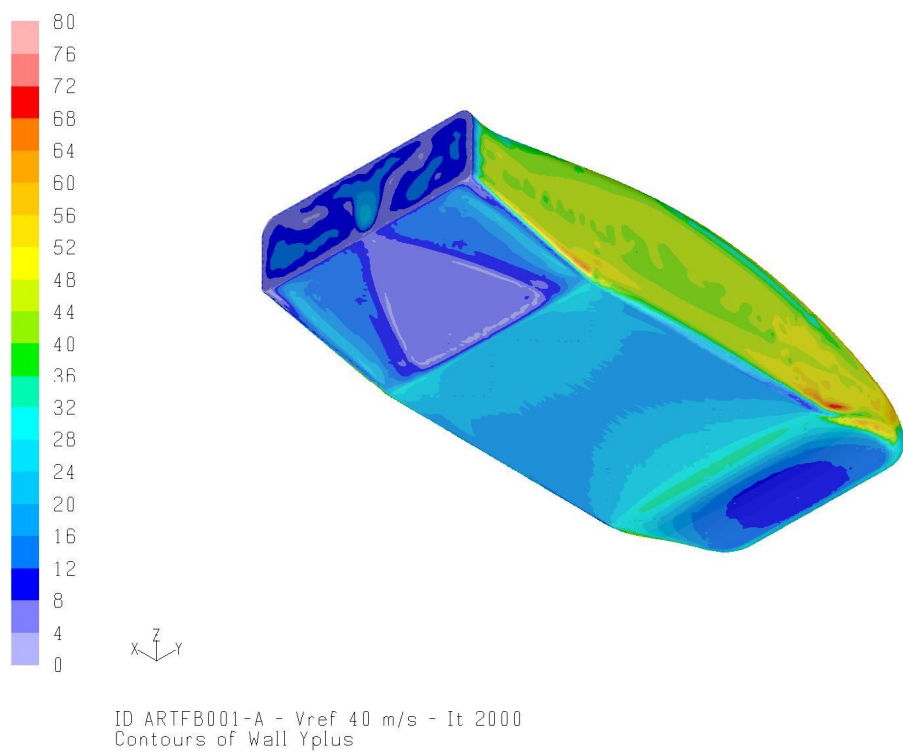
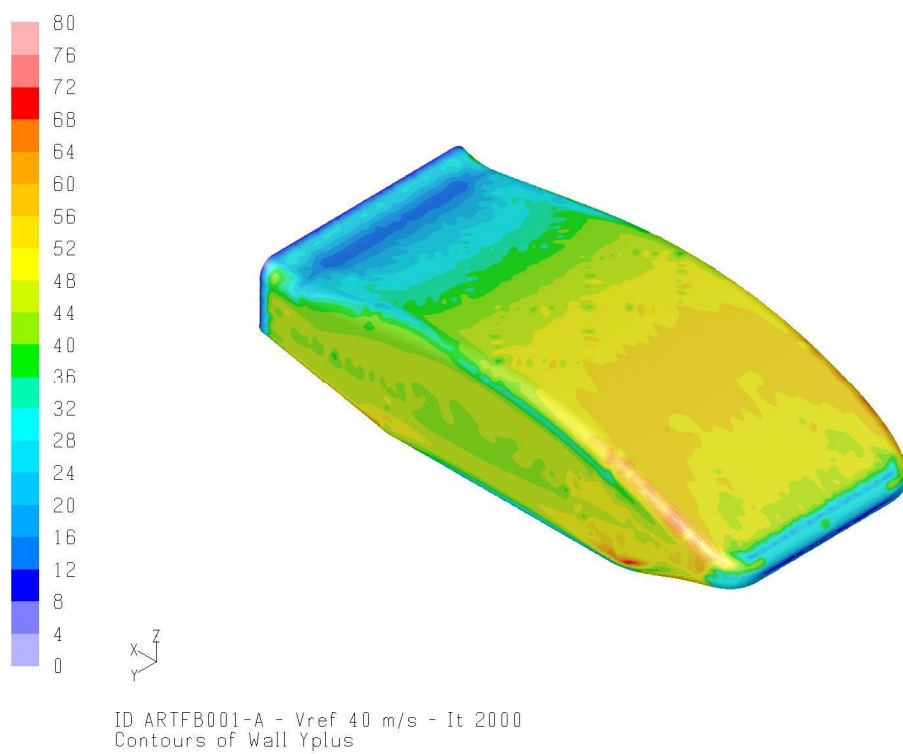
**Figure 27 - Domino e sottodomini in caso di flusso libero**

Nel caso di flusso libero due sottodomini sono creati intorno al modello, il dominio più piccolo circonda il modello ed è stato creato per avere una griglia estremamente fine di quattro strati di prismi più i vari strati di tetraedri allo scopo di registrare il comportamento dello

strato limite del flusso, eventuali separazioni nella parte posteriore in pendenza e anche per raggiungere valori di  $Y_{wall+}$  accettabili. Il valore massimo di  $Y_{wall+}$  è di circa 64 (Figura 28 -  $Y_{wall+}$  caso di flusso libero) che è entro i limiti accettabili per il modello di turbolenza K- $\epsilon$  utilizzato per le prime 50 iterazioni e per il modello di turbolenza RSM utilizzato per le 2000 iterazioni finali. Nel caso in esame si considera accettabile valori di  $Y_{wall+}$  fino a 100.

L'intero dominio è lungo 50 metri, largo 32 metri e alto 16 metri, rispetto al corpo di calibrazione lungo 1.5 metri, largo 0.6 metri e alto 0.38 metri, al fine di garantire che il flusso sia pienamente sviluppato prima di raggiungere il modello, che la scia sia completamente registrata, il flusso attorno e sopra al modello sia libero e indisturbato.

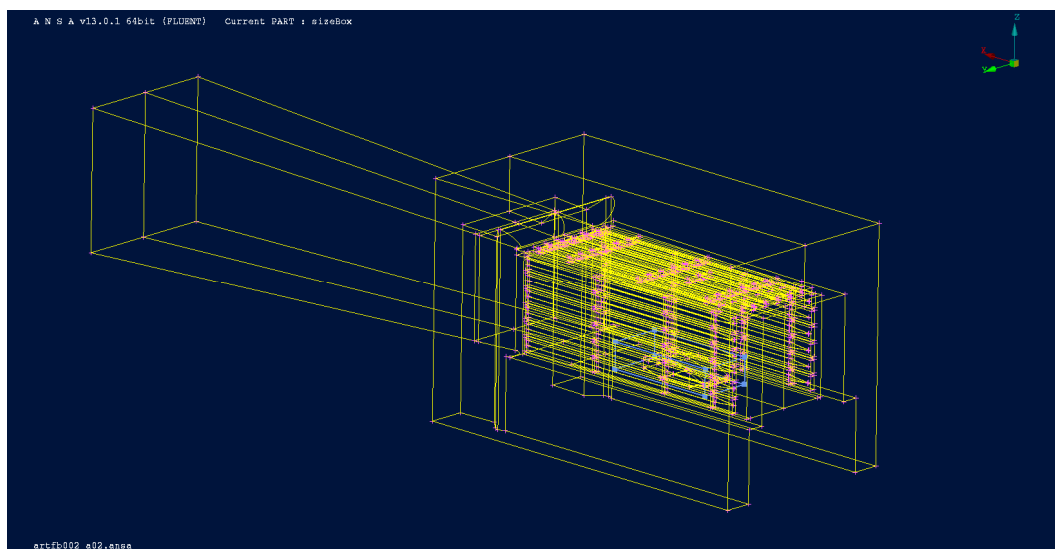
## Capitolo 4 - Analisi CFD



**Figure 28 -  $Y_{wall+}$  caso di flusso libero**

### 4.5.2 Domini caso di galleria con e senza strutta di supporto

L'intero dominio è composto da 1 solo sottodominio per un totale di circa 44 e 45 milioni di elementi nei casi di flusso in galleria del vento senza e con STING (Figura 29 – Dominio e sottodomini in caso di flusso in galleria del vento), ed è sufficientemente dettagliato nei casi di flusso in galleria del vento da cogliere tutte le strutture vorticose sviluppate, essendo comunque il dominio limitato dalla presenza delle pareti.



**Figure 29 - Dominio e sottodomini in caso di flusso in galleria del vento**

Nel caso di flusso in galleria del vento con e senza struttura di supporto vi è un solo sottodominio creato intorno al modello e lo circonda per avere una griglia estremamente fine di quattro strati di prismi più i vari strati di tetraedri allo scopo di registrare il comportamento dello strato limite del flusso, eventuali separazioni nella parte posteriore in pendenza e anche per raggiungere valori di  $Y_{wall+}$  accettabili. Il valore massimo di  $Y_{wall+}$  è di circa 64 su Artemio

e circa 80 sulla parte superiore della struttura di supporto, il piastrone (Figura 30 -  $Y_{wall+}$  caso di flusso in galleria del vento) che è entro i limiti accettabili per il modello di turbolenza K- $\epsilon$  utilizzato per le prime 50 iterazioni e per il modello di turbolenza RSM utilizzato per le 2000 iterazioni finali. Nel caso in esame si considera accettabile valori di  $Y_{wall+}$  fino a 100.

## Domini nello spazio di integrazione

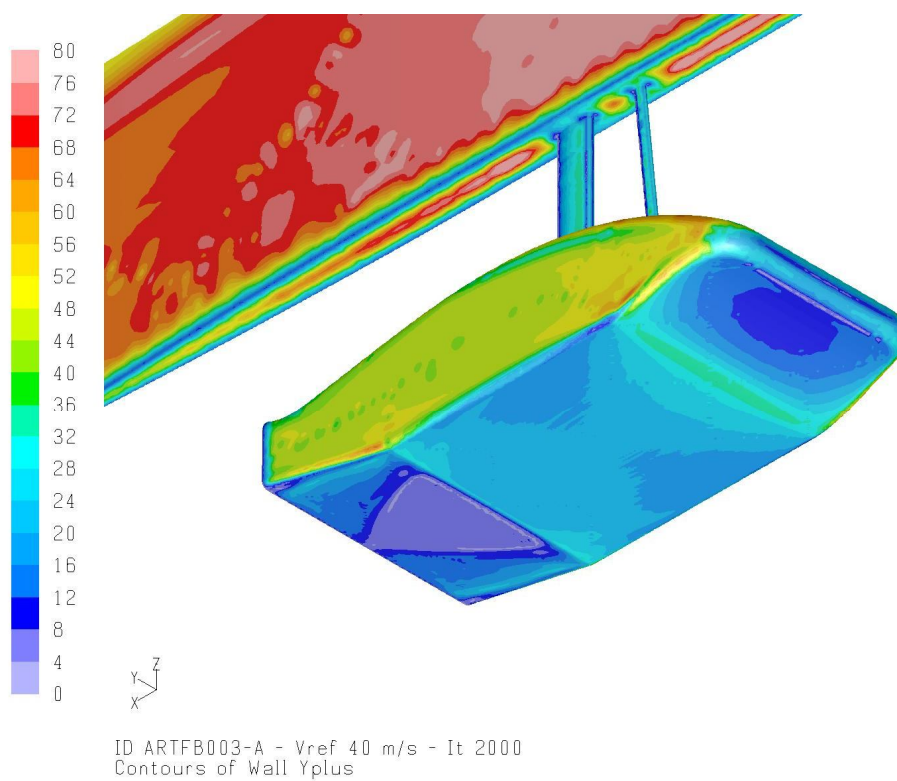
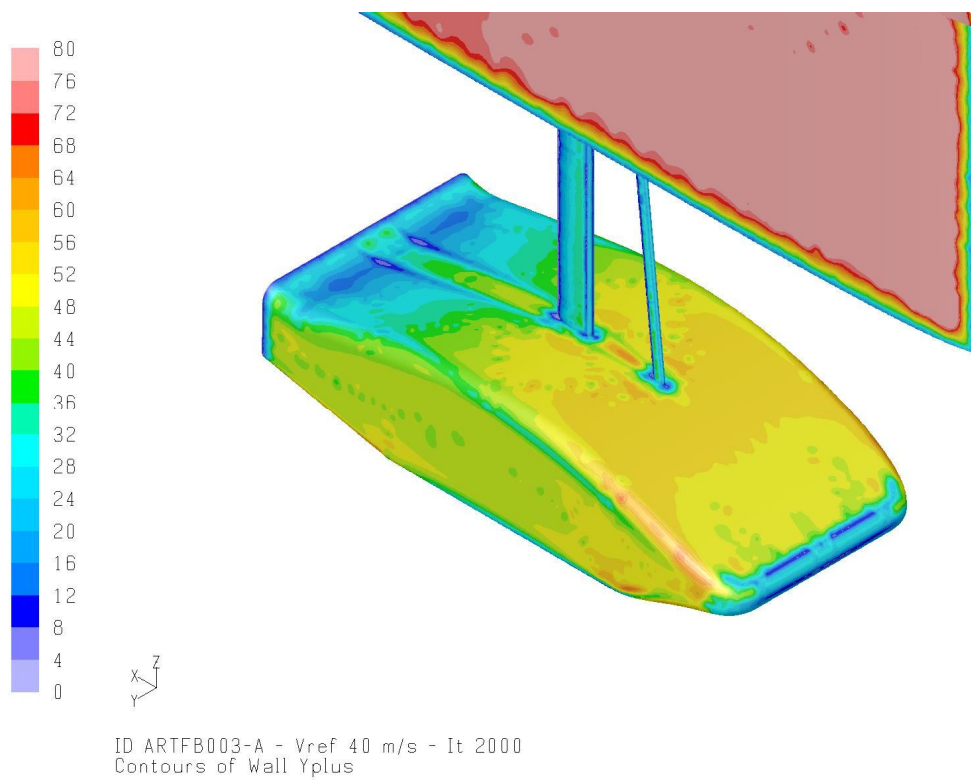


Figure 30 - Y<sub>wall</sub>+ caso di flusso in galleria del vento

## 4.6 Simulazione CFD con FLUENT 6.3.26

FLUENT è un pacchetto software sviluppato per la modellazione di flussi di fluido in un'un'ampia gamma di applicazioni. L'utilizzo di questo pacchetto CFD, le equazioni che governano il moto dei fluidi e le condizioni al contorno possono essere discretizzate e risolte per velocità, temperatura e distribuzioni di pressione all'interno del dominio.

FLUENT offre una completa serie di funzionalità di modellazione per una vasta gamma di problemi di flusso di fluidi incomprimibili e comprimibili, laminari e turbolenti, possono essere inoltre eseguite analisi stazionarie o transitori. In FLUENT, una vasta gamma di modelli matematici per fenomeni di trasporto (come il trasferimento di calore e di sostanze chimiche dovute a reazioni) si combina con la possibilità di modellare geometrie complesse. Esempi di applicazioni di FLUENT includono gli studi aerodinamici su veicoli a terra, trasferimento di calore combinato in componenti di motori automobilistici, flussi newtoniani non laminari nelle apparecchiature industriali, combustione del carbone polverizzato in caldaie industriali, flusso attraverso compressori, pompe e ventilatori e flussi multifase in condotti.

Modelli di turbolenza robusti e accurati sono una componente vitale di FLUENT e forniscono una vasta gamma di applicabilità, comprendendo gli effetti di altri fenomeni fisici, come ad esempio galleggiamento e compressibilità. Particolare cura è stata dedicata alle problematiche relative alla precisione in prossimità delle pareti mediante l'utilizzo di funzioni di prossimità estese e modelli zonal.

Per tutti i flussi FLUENT risolve equazioni di conservazione della massa e quantità di moto, inoltre per i flussi che coinvolgono il trasferimento di calore o di compressione è necessaria un'ulteriore equazione di conservazione dell'energia. Quando il flusso è turbolento sono necessarie equazioni di trasporto supplementari. L'equazione di conservazione della massa, o equazione di continuità, può essere scritta come segue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (4.6.1)$$

Equazione 4.6.1 è la forma generale dell'equazione di conservazione della massa ed è valida sia per flussi incomprimibili che per flussi comprimibili.  $\rho$ ,  $t$ ,  $\mathbf{u}$  rappresentano rispettivamente la densità di flusso, il tempo, e la velocità, mentre la fonte  $S_m$  è la massa aggiunta alla fase del continuo dalla seconda fase dispersa, ad esempio a causa di vaporizzazione delle gocce di liquido e le eventuali fonti definite dall'utente. Nella nostra applicazione,  $S_m$  è pari a zero. L'equazione per la conservazione della quantità di moto può essere scritta come segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mathbf{\Gamma}) + \mathbf{F} \quad (4.6.2)$$

dove  $p$  è la pressione statica,  $\mathbf{\Gamma}$  è il tensore di stress e  $\mathbf{F}$  è la forza gravitazionale del corpo e le forze esterne, ad esempio derivate dalla interazione con le fasi disperse.  $\mathbf{F}$  contiene anche altri termini dipendenti dal modello, come mezzi sorgente porosi e fonti definite dall'utente.



Il tensore di stress  $\Gamma$  è dato da:

$$\Gamma = \mu[(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \cdot \mathbf{I}] \quad (4.6.3)$$

dove  $\mu$  è la viscosità molecolare,  $\mathbf{I}$  è il tensore unitario, e il secondo termine nella parte destra è l'effetto della dilatazione del volume.

A causa l'elevato di flusso di massa e di flussi complessi associati al corpo in esame, il flusso è considerato turbolento. Le equazioni di base descritte in precedenza sono adatte solo per descrivere un flusso laminare, a meno che sia utilizzata una tecnica di simulazione numerica diretta DNS. La turbolenza può essere caratterizzata come un flusso tridimensionale, dipendente dal tempo, caotico, casuale e dissipativo. In un flusso turbolento esiste una cascata energia corrispondente ad una vasta gamma di scale di lunghezza, dai vortici più grandi (scale di lunghezza anisotrope integrali) a vortici più piccoli (scale di lunghezza isotrope di Kolmogorov). Utilizzando l'analisi dimensionale è noto che al fine di cogliere le scale di lunghezza è necessaria una mesh con le griglie computazionali territoriali dell'ordine di  $O(Re^{9/4})$  e passi temporali dell'ordine di  $O(Re^{3/4})$ . Nel nostro caso considerando un numero di Reynolds basato sulla lunghezza del corpo di calibrazione dell'ordine di  $4 \cdot 10^6$ , si avrebbe una mesh con griglie territoriali dell'ordine di  $10^{15}$  con passi temporali dell'ordine  $10^5$ . Pertanto la simulazione numerica diretta (DNS) di un flusso turbolento con un numero di Reynolds alto per simulare correttamente il flusso attorno ad un veicolo sportivo è praticamente impossibile, anche con la capacità di calcolo dei computer di oggi.

Flussi turbolenti sono caratterizzati da fluttuazioni del campo di velocità e queste fluttuazioni miscelano quantità di trasporto, come quantità di moto, energia, concentrazione delle specie, il cui risultato è la fluttuazione dei quantitativi trasportati essi stessi. Dato che queste fluttuazioni possono essere di piccola scala e ad alta frequenza, sono troppo costose computazionalmente per simularle direttamente nei calcoli pratici. Invece le equazioni istantanee che governano il moto dei fluidi, cioè esatte, possono essere mediate nel tempo, o altrimenti manipolate per eliminare le scale più piccole, derivando una serie di equazioni modificate che sono computazionalmente meno costose da risolvere. Tuttavia, le equazioni modificate contengono ulteriori variabili sconosciute e sono necessari modelli di turbolenza per determinare queste variabili in termini di quantità note.

Per la maggior parte delle applicazioni pratiche la media temporale o spaziale filtrata delle proprietà del flusso è di interesse, in tal modo la media temporale delle equazioni di trasporto, quali le equazioni mediate di Navier-Stokes (RANS), sono utilizzate. Tuttavia le equazioni mediate nel tempo purtroppo non sono chiuse e quindi ulteriori metodi di chiusura, corrispondenti a diversi modelli di turbolenza devono essere sviluppati.

### 4.6.1 Modello standard K- $\epsilon$

Il modello standard K- $\epsilon$  è un modello semi-empirico basato sulle equazioni per la energia cinetica turbolenta ( $k$ ) e il suo tasso di dissipazione ( $\epsilon$ ). L'equazione del modello di trasporto per l'energia cinetica turbolenta è calcolato con l'equazione esatta, mentre l'equazione per il modello di trasporto della velocità di dissipazione è stata ottenuta usando il ragionamento fisico e assomiglia poco alla sua

controparte matematicamente esatta. L'energia cinetica turbolenta,  $k$ , e il suo rateo di dissipazione, si ottengono dalle equazioni seguenti di trasporto:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (4.6.1.1)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \varepsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.6.1.2)$$

In queste equazioni  $G_k$  rappresenta la generazione di energia cinetica turbolenta a causa dei gradienti di velocità media.  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  sono costanti.  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  sono i numeri di Prandtl turbolenti per  $k$  e  $\varepsilon$  rispettivamente.  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  sono termini sorgente definiti dall'utente.

La viscosità turbolenta  $\mu_t$  viene calcolato combinando  $k$  e  $\varepsilon$  come segue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.6.1.3)$$

Dove  $C_\mu$  è una costante.

Le costanti  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ , e  $\sigma_\varepsilon$  hanno i seguenti valori di default:

| Costanti del modello | Valori standard |
|----------------------|-----------------|
| $C_{1\varepsilon}$   | 1.44            |
| $C_{2\varepsilon}$   | 1.92            |
| $C_{\mu}$            | 0.09            |
| $\sigma_k$           | 1.0             |
| $\sigma_\varepsilon$ | 1.3             |

**Table 1 - Valori standard delle costanti del modello k -  $\varepsilon$**

Questi valori predefiniti sono stati determinati da esperimenti con aria e acqua per i fondamentali flussi turbolenti compresi flussi omogenei e griglie di turbolenza di decadimento isotropo. Sono stati ottimizzati per lavorare abbastanza bene per un'ampia gamma di flussi di parete e flussi liberi. Le condizioni al contorno per risolvere le equazioni del modello  $k - \varepsilon$  standard sono riassunti nella Tabella 2 (Launder e Spalding, 1974).

| Tipo di Contorno   | Condizioni al Contorno  |
|--|---|
| Ingresso:  | Assegnate $k$ ed $\varepsilon$  |
| Uscita:  | $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ e $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$ |
| Flusso libero:   | $k=0$ ed $\varepsilon=0$  |
| Pareti solide:   | Funzioni di parete standard   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><math>y^* &gt; 11.225</math></li> </ul> | $u^* = \frac{1}{K} \ln(E y^*)$  |

|   |  |
|---|--|
|   | <p>dove</p> $u^* \equiv \frac{u_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho}$ $y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu}$ <p><math>u_p</math> è la velocità media del punto P vicino alla parete</p> <p><math>u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}</math> è la velocità d'attrito</p> <p><math>y_p</math> è la distanza del punto P dalla parete</p> <p><math>K</math> è la costante di Von Karman (0.42)</p> <p><math>E</math> è la rugosità superficiale della parete</p> <p><math>k_p</math> è l'energia cinetica turbolenta nel punto P</p> $\varepsilon_p \equiv \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{K y_p}$ |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>y^* &lt; 11.225</math></li> </ul> <p>Nelle celle adiacenti alla parete</p> | $u^* = y^*$  |

#### 4.6.2 Modello RSM

Il modello di turbolenza basato sul tensore di stress di Reynolds (RSM) è il tipo più elaborato di modello disponibile in FLUENT e prevede l'abbandono dell'ipotesi di una viscosità isotropa. La RSM chiude le equazioni mediate di Reynolds e Navier-Stokes risolvendo

equazioni di trasporto per tutte le componenti del tensore di Reynolds, insieme ad una equazione per il rateo di dissipazione, il che significa che cinque equazioni di trasporto supplementari sono necessarie in flussi bidimensionale e a sette equazioni di trasporto supplementari devono essere risolte in flussi tridimensionali.

Quindi i calcoli effettuati con questo modello forniscono previsioni più accurate per flussi in cui siano presenti superfici con notevole curvatura, rotazionali e rapidi cambiamenti nella velocità di deformazione rispetto ai modelli ad una e due equazioni. Comunque la fedeltà delle previsioni RSM è ancora limitata dalle ipotesi di chiusura utilizzati per modellare vari termini delle equazioni di trasporto per il tensore degli stress di Reynolds. La modellazione del termine di pressione e i termini dei ratei di dissipazione risulta ancora particolarmente difficile e spesso considerati responsabili per compromettere l'accuratezza delle previsioni RSM.

Le equazioni di trasporto esatte per il tensore degli stress di Reynolds possono essere scritte come segue:

$$\begin{aligned}
 &(\text{Derivata locale temporale}) + (C_{ij} \equiv \text{Convezione}) = (D_{T,ij} \equiv \\
 &\text{Diffusione turbolenta}) + (D_{L,ij} \equiv \text{Diffusione molecolare}) - (P_{ij} \equiv \\
 &\text{Pressione isotropa}) + (G_{ij} \equiv \text{Galleggiabilità}) + (\phi_{ij} \equiv \text{Pressione} \\
 &\text{viscosa}) - (\epsilon_{ij} \equiv \text{Dissipazione}) - (F_{ij} \equiv \text{Azione del sistema rotante}) + \\
 &(\text{Termine sorgente definito dall'utente})
 \end{aligned}$$

Ovvero in forma estesa:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) = & - \frac{\partial}{\partial x_k} [\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \\
 & \overline{p(\sigma_{kj} u'_i + \sigma_{ik} u'_j)}] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \\
 & \rho ( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} ) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \Theta} + g_j \overline{u'_i \Theta}) + \\
 & \overline{p(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i})} - 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_i} \epsilon_{ikm} + \\
 & \overline{u'_i u'_m} \epsilon_{jkm}) + S_m
 \end{aligned} \tag{4.6.2.1}$$

Dei vari termini in queste equazioni esatte,  $C_{ij}$ ,  $D_{L,ij}$ ,  $P_{ij}$  e  $F_{ij}$ , non richiedono alcuna modellazione. Tuttavia  $D_{T,ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $\phi_{ij}$  e  $\epsilon_{ij}$  devono essere modellati per chiudere le equazioni. Di seguito si descrivono le ipotesi di modellazione necessarie per chiudere l'insieme delle equazioni.

$D_{T,ij}$  può essere modellato dal modello generalizzato del gradiente di diffusione di Daly e Harlow, tuttavia questa equazione può causare instabilità numerica, così è stato semplificato FLUENT per utilizzare una diffusività turbolenta scalari come segue:



$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (4.6.2.2)$$

Lien e Leschziner hanno derivato un valore di  $\sigma_k = 0.82$  applicando il modello generalizzato del gradiente di diffusione al caso di un flusso planare omogeneo. Si noti che questo valore di  $\sigma_k$  è diverso da quella del modello k-ε standard in cui  $\sigma_k = 1.0$ .

L'approccio classico alla modellazione di  $\phi_{ij}$  utilizza la seguente decomposizione proposta da Gibson e Launder:

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} + \phi_{ij,w} \quad (4.6.2.3)$$

dove  $\phi_{ij,1}$  è il termine della pressione di distorsione,  $\phi_{ij,2}$  si chiama la pressione isotropa e  $\phi_{ij,w}$  è il termine di riflessione di parete. La pressione di storsione,  $\phi_{ij,1}$  è modellato come segue:

$$\phi_{ij,1} \equiv -C_1 \rho \frac{\epsilon}{k} [\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \sigma_{ik} k] \quad (4.6.2.4)$$

con  $C_1 = 1.8$ .

La pressione isotropa  $\phi_{ij,2}$  è modellata nel modo seguente:

$$\phi_{ij,2} \equiv -C_2 [(P_{ij} + F_{ij} + 5/6 G_{ij} - C_{ij}) - \frac{2}{3} \sigma_{ij} (P + 5/6 G - C)] \quad (4.6.2.5)$$

dove  $C_2 = 0.60$ ,  $P_{ij}$ ,  $F_{ij}$ ,  $G_{ij}$  e  $C_{ij}$  sono definite come nella equazione (4.6.2.1),  $P = \frac{1}{2}P_{kk}$ ,  $G = \frac{1}{2}G_{kk}$  e  $C = \frac{1}{2}C_{kk}$ .

Il termine di riflessione alla parete  $\phi_{ij,w}$ , è responsabile della ridistribuzione della componente normale alla parete e tende ad ammortizzare le sollecitazioni normali perpendicolari alla parete. Questo termine viene modellato come segue:

$$\begin{aligned} \phi_{ij,w} \equiv & C'_1 \frac{\epsilon}{k} \left( \overline{u'_k u'_m} n_k n_m \sigma_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_l u'_k} n_j n_k \right) \frac{C_l k^{3/2}}{\epsilon d} + \\ & C'_2 \left( \phi_{km,2} n_k n_m \sigma_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_j n_k \right) \frac{C_l k^{3/2}}{\epsilon d} \end{aligned} \quad (4.6.2.6)$$

dove  $C'_1 = 0.5$ ,  $C'_2 = 0.3$ ,  $n_k$  è la k-esima componente dell'unità normale alla parete,  $d$  è la distanza normale alla parete,  $C_l = C_\mu^{3/4}/k$  con  $C_\mu = 0.09$  e  $k$  è la costante di Von Karman ( $k = 0.4187$ ).

Il termine dovuto al galleggiamento è modellato come segue:

$$G_{ij} = (\overline{J_i U_j} + \overline{J_j U_i}) = -\beta (g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{U_i \theta}) \quad (4.6.2.7)$$

$$\overline{U_i \theta} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \left( \frac{\partial T}{\partial X_i} \right) \quad (4.6.2.8)$$

dove  $Pr_t$  è il numero di Prandtl per l'energia turbolenta, il cui valore reimpostato standard è 0.85.

In generale quando l'energia cinetica turbolenta è modellata in uno specifico termine, esso è ottenuto assumendo la traccia del tensore degli sforzi di Reynolds:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (4.6.2.9)$$

In FLUENT è disponibile un'opzione per risolvere l'equazione di trasporto dell'energia cinetica turbolenta, allo scopo di ottenere le condizioni al contorno per il tensore degli sforzi di Reynolds. In questo caso è utilizzata la seguente equazione:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \epsilon (1 + 2M_t^2) + S_k \end{aligned} \quad (4.6.2.10)$$

dove  $\sigma_k = 0.82$  e  $S_k$  è un termine sorgente definito dall'utente. L'equazione (4.6.2.10) è ottenibile semplificando l'equazione modellata per il tensore degli stress di Reynolds e come ci si potrebbe aspettare, è sostanzialmente identica a quella utilizzata nel modello K- $\epsilon$  standard.

Anche se l'equazione (4.6.2.10) è risolta a livello globale in tutto il dominio del flusso, i valori di  $k$  ottenuti sono utilizzati solo per le condizioni al contorno. In ogni altro caso,  $k$  è ottenuto dall'equazione (4.6.2.9). Questo è un punto di minore importanza, tuttavia, dal momento che i valori di  $k$  ottenuti con entrambi i metodi dovrebbero essere molto simili.

Il tensore dissipazione  $\epsilon_{ij}$  è modellato come segue:

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_{ij} (\rho \epsilon + Y_M) \quad (4.6.2.11)$$

dove  $Y_M = 2\rho\epsilon M_t^2$  è un termine dissipativo di dilatazione addizionale in accordo col modello di Sarkar. Il numero di Mach turbolento è definito come:

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (4.6.2.12)$$

Questa comprimibilità modificata è utilizzata la legge dei gas perfetti in forma comprimibile. La velocità di dissipazione scalare  $\epsilon$  è calcolata con un modello di equazione di trasporto simile a quella usata nel modello K- $\epsilon$  standard:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] C_{\epsilon 1} \frac{1}{2} (P_{ii} + \\ C_{\epsilon 3} G_{ii}) \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4.6.2.13)$$

dove  $\sigma_\epsilon = 1.0$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$  e  $C_{\epsilon 3}$  è valutato come una funzione della direzione del flusso locale relativa al vettore accelerazione di gravità, mentre  $S_\epsilon$  è un termine sorgente definito dall'utente.

La viscosità turbolenta è calcolata in modo molto simile al modello K- $\epsilon$  standard:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.6.2.14)$$

dove  $C_\mu = 0.09$ .

Il modello RSM in FLUENT richiede condizioni al contorno per i singoli termini del tensore degli stress di Reynolds  $\overline{u'_i u'_j}$ , e per la velocità di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta. Tali quantità possono essere inserite direttamente o derivate dall'intensità della turbolenza e dalla lunghezza caratteristica. FLUENT applica esplicite condizioni al contorno alla parete per il tensore degli stress di Reynolds utilizzando leggi logaritmiche e l'ipotesi di equilibrio, senza tener conto di convezione e diffusione nelle equazioni di trasporto per le sollecitazioni. Utilizzando un sistema di coordinate locale dove  $\tau$  è la coordinata tangenziale,  $\eta$  è la coordinata normale e  $\lambda$  è la coordinata binormale, il tensore di Reynolds nelle celle adiacenti la parete (assumendo funzioni di parete standard o funzioni di parete di non equilibrio) è calcolato da:

$$\frac{\overline{u'^2_\tau}}{k} = 1.098, \frac{\overline{u'^2_\eta}}{k} = 0.247, \frac{\overline{u'^2_\lambda}}{k} = 0.655, -\frac{\overline{u'_\tau u'_\eta}}{k} = 0.255 \quad (4.6.2.15)$$

Per ottenere  $k$  FLUENT risolve l'equazione di trasporto dell'energia cinetica turbolenta (4.6.2.10). Per ragioni di comodità di calcolo l'equazione è risolta a livello globale, anche se valori di  $k$  così calcolati sono necessari solo vicino alla parete, mentre nel campo lontano  $k$  si ottiene direttamente dall'equazione (4.6.2.09). Per impostazione predefinita, i valori del tensore di Reynolds vicino alla parete sono fissate utilizzando i valori calcolati dalle formule (4.6.2.15) e le equazioni di trasporto sono risolti solo nella regione interna.

# 5

## Discussione dei risultati

---

La precisione delle analisi CFD è determinata in larga misura dalla qualità del modello fisico nel software e dalla capacità del software di cogliere la stretta attinenza con la geometria vera dell'elemento fisico che vogliamo modellare. FLUENT fornisce una vasta gamma di modelli (come discusso nel capitolo 4), tra cui:

- Flusso incomprimibile e comprimibile.
- Una serie di modelli di turbolenza, incluso alti e bassi numeri di Reynolds.

FLUENT presenta caratteristiche tecniche di modellazione non strutturata tale da permettere di costruire una serie di maglie per avvolgere le curve, piani inclinati e altre superfici complesse. Esso



offre anche la possibilità di affinare la maglia di calcolo in settori di particolare importanza.

Come accennato nel capitolo 4, si utilizza in prima approssimazione il modello K- $\epsilon$  molto robusto, ma anche dissipativo a causa della notevole viscosità turbolenta introdotta, poi dopo circa 50 iterazioni i risultati sono inseriti nel più accurato modello RSM, scelto in questa indagine come modello di turbolenza in quanto capace di cogliere con precisione il profilo di velocità alla parete, a cui si aggiunge una equazione di parete lineare. Le condizioni al contorno in uscita sono uguali per i tre casi, ovvero pressione di attraversamento uguale alla pressione atmosferica standard, mentre per gli altri lati sono ovviamente differenti.

Nel caso di corpo libero all'ingresso si impone una velocità di 40 m/sec con una intensità turbolenta dello 0.1% e una lunghezza caratteristica della scala turbolenta di 0.1 m, sul suolo si impongono delle condizioni da parete in traslazione, ovvero velocità di attraversamento nulla e di trascinamento pari a 40 m/sec, mentre sulle pareti laterali e sul soffitto si impone solo la non compenetrazione, quindi velocità di attraversamento nulla e velocità tangenziale dipendente dalla soluzione nel dominio.

Nei casi di corpi in galleria del vento con e senza la struttura di supporto all'ingresso si impone la medesima velocità di 40 m/sec con una intensità turbolenta di 0.02% e una lunghezza caratteristica della scala turbolenta di 0.01 m, il suolo si divide nella zona del suolo mobile in cui si impone la parete in traslazione con velocità di attraversamento nulla e di trascinamento pari a 40 m/sec e la zona circostante in cui si impone la condizione di parete, quindi velocità

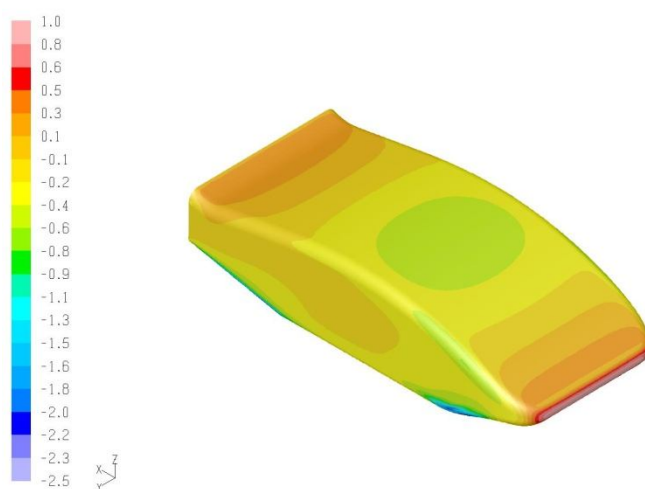
nulla in entrambe le sue componenti, come anche sulle pareti laterali sul soffitto e sul corpo.

Il dominio e la griglia sono presentati nel capitolo 4 (Analisi CFD). La velocità di ingresso è di 40 m/s con un numero di Reynolds sulla lunghezza base del modello di  $4 \times 10^6$ .

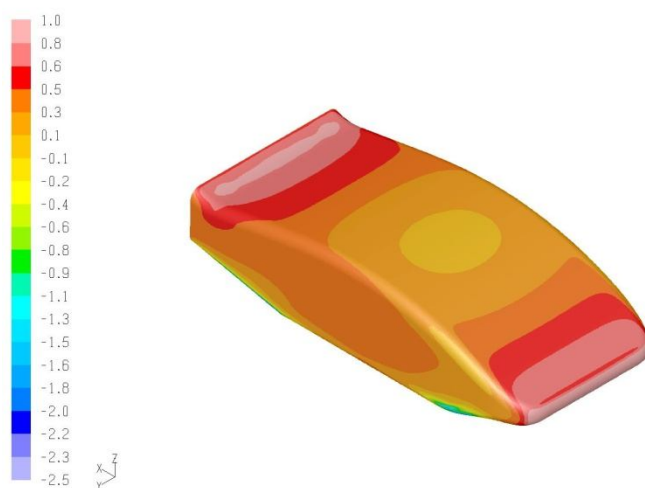
### 5.1 Rappresentazione del $C_p$

Per ogni pagina è rappresentata la distribuzione del coefficiente di pressione per i 3 casi in esame in assonometria, mentre per le rappresentazioni nei piani coordinati si rimanda alla appendice A dove sono disponibili integralmente tutte le immagini.

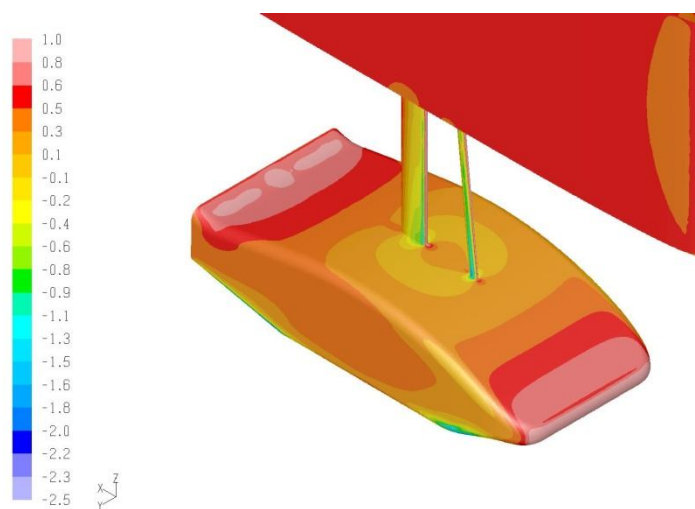
## Rappresentazione del $C_p$



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient

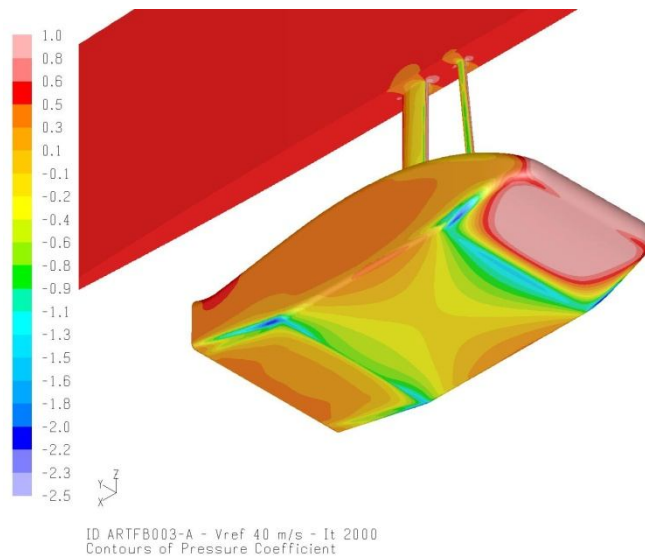
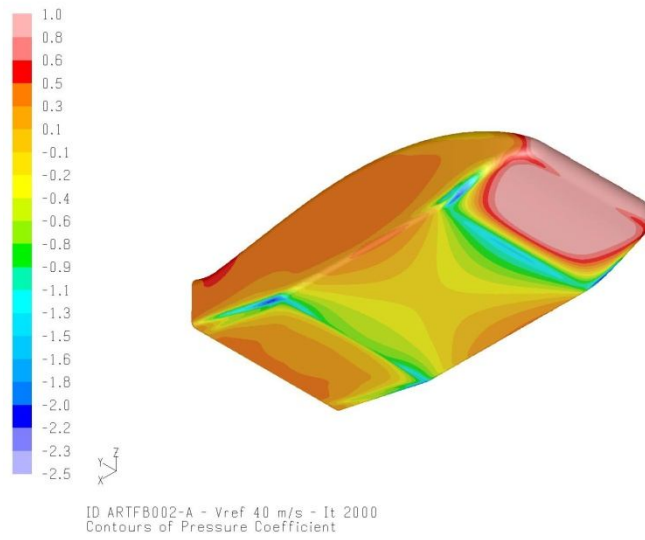
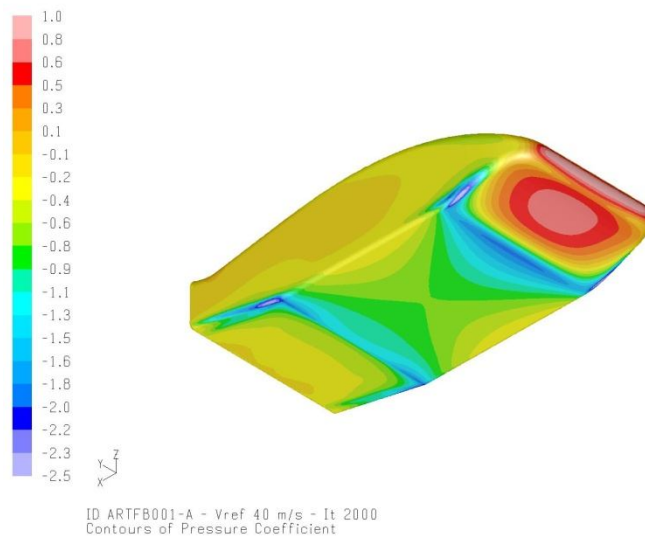


ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient

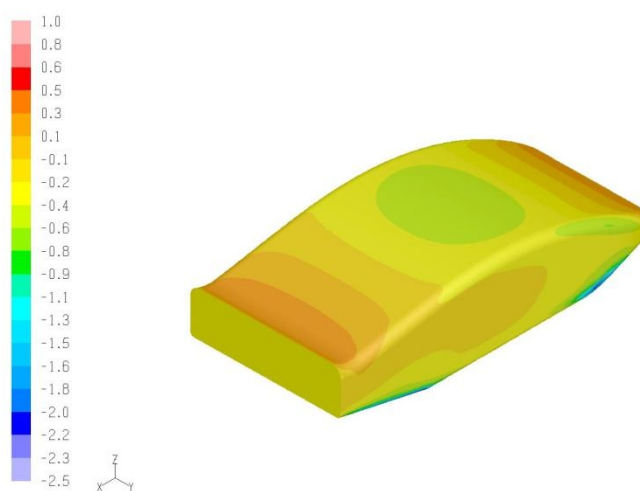


ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient

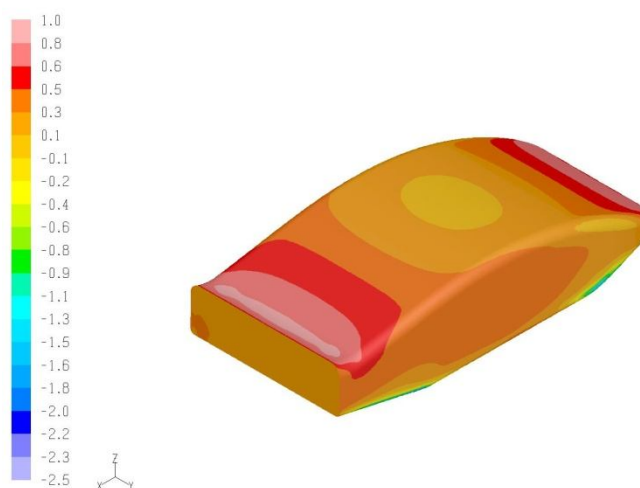
## Capitolo 5 - Discussione dei risultati



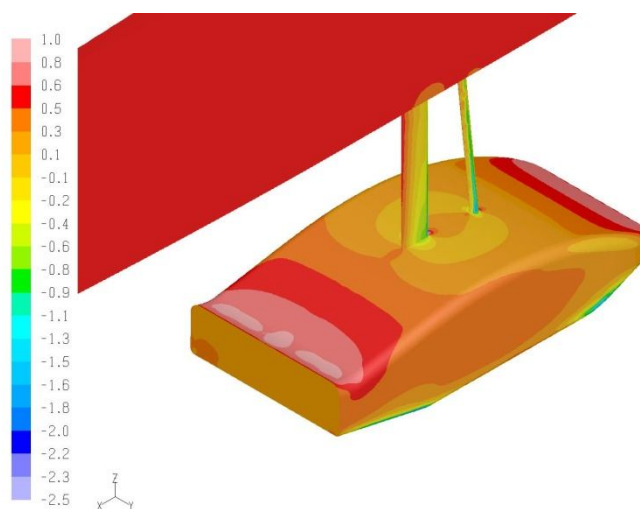
## Rappresentazione del $C_p$



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient

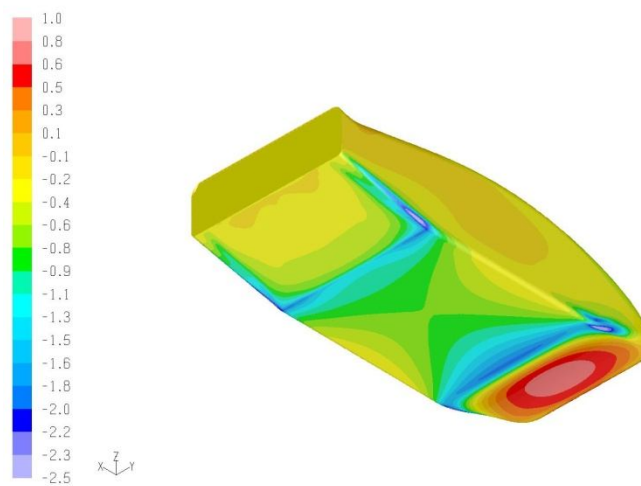


ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient

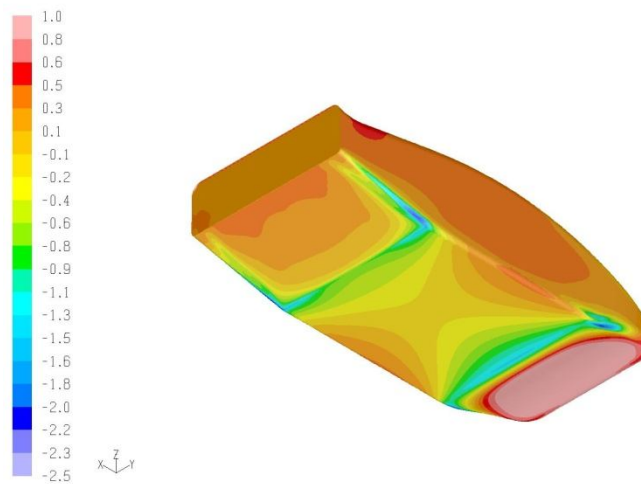


ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient

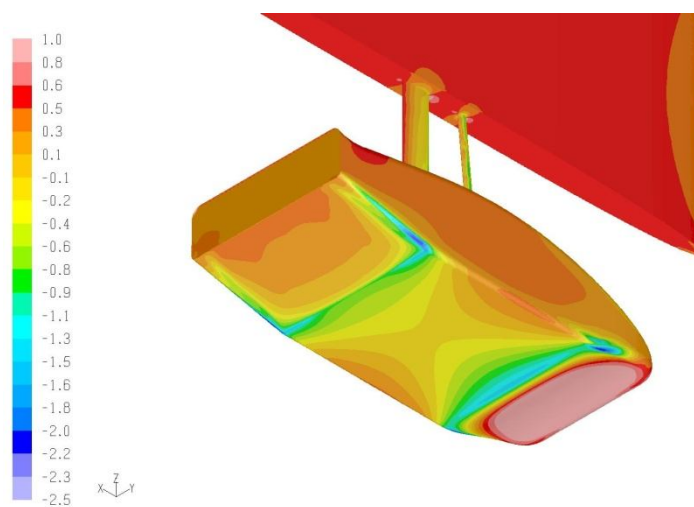
## Capitolo 5 - Discussione dei risultati



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient



ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient



ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Pressure Coefficient



L'andamento qualitativo nei tre casi è molto simile, ciò che appare molto evidente è la deriva del coefficiente di pressione nei casi in galleria del vento, in cui la pressione è decisamente maggiore rispetto al caso in flusso libero.

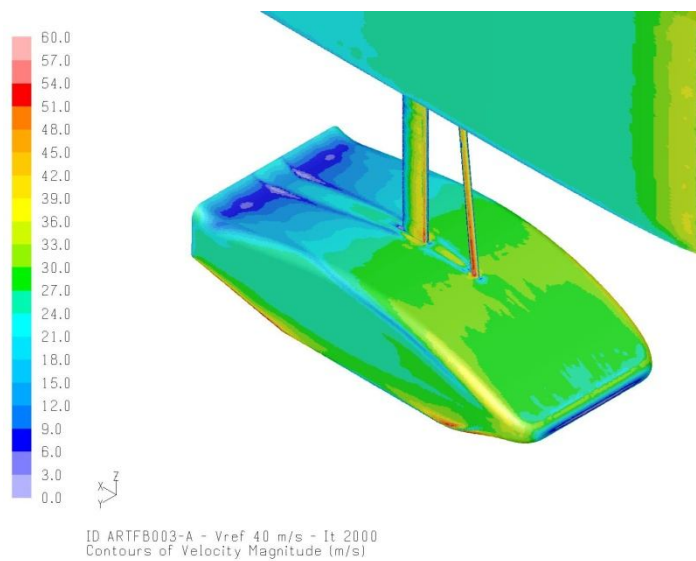
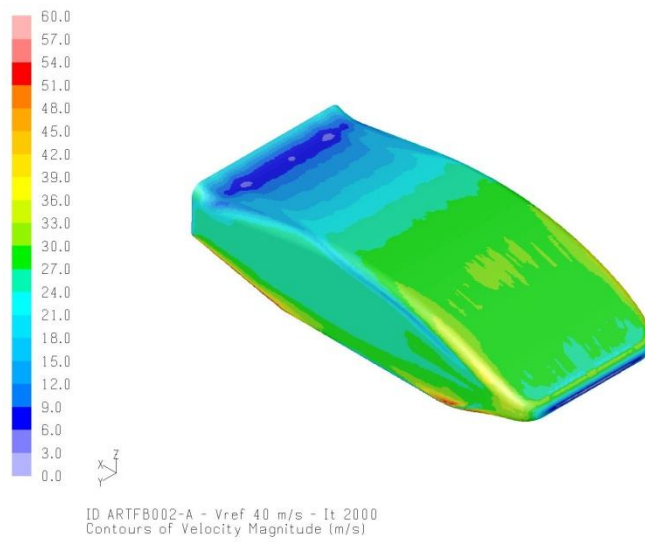
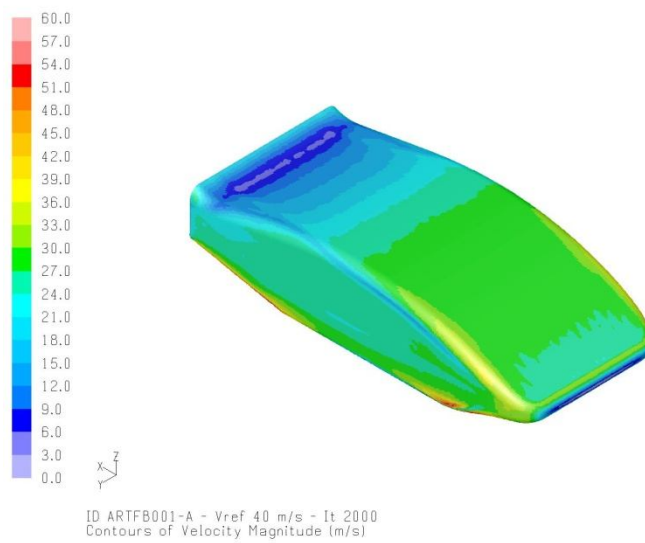
Elemento estremamente importante è il diffusore anteriore, che lavora in condizioni diverse nei casi in galleria del vento in cui risulta essere in compressione.

La scia dello sting influenza l'intensità del coefficiente di pressione nella parte posteriore del modello, in particolare sullo spoiler.

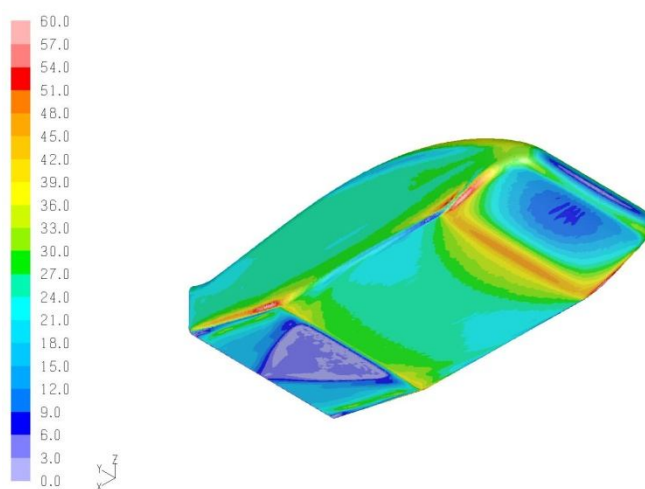
## **5.2 Rappresentazione del modulo della velocità**

Per ogni pagina è rappresentata la distribuzione del modulo della velocità per i 3 casi in esame in assonometria, mentre per le rappresentazioni nei piani coordinati si rimanda alla appendice B dove sono disponibili integralmente tutte le immagini.

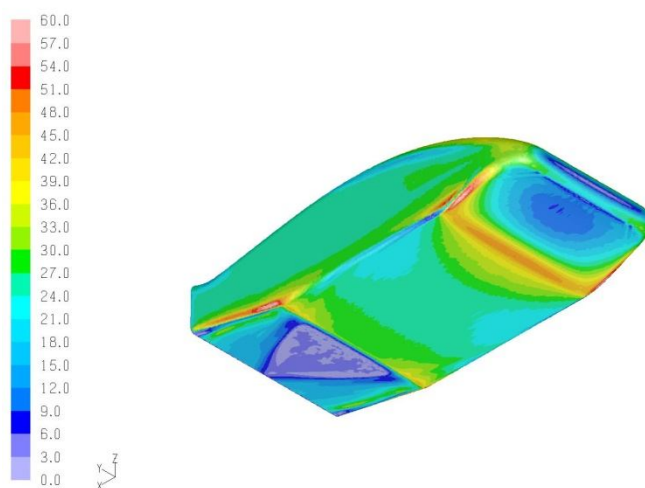
## Capitolo 5 - Discussione dei risultati



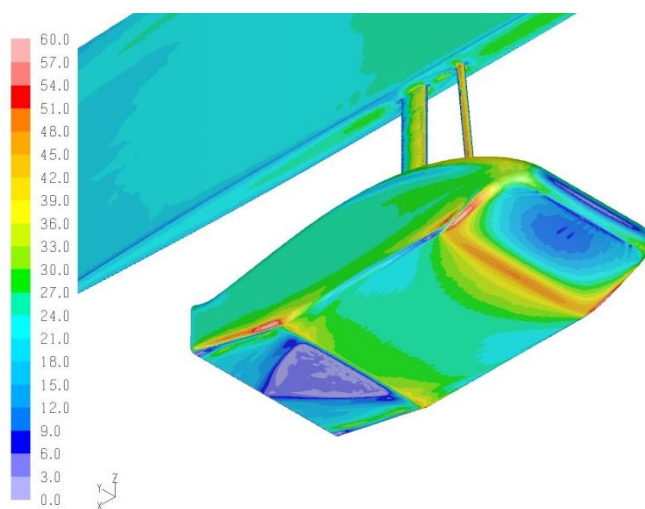
## Rappresentazione del modulo della velocità



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

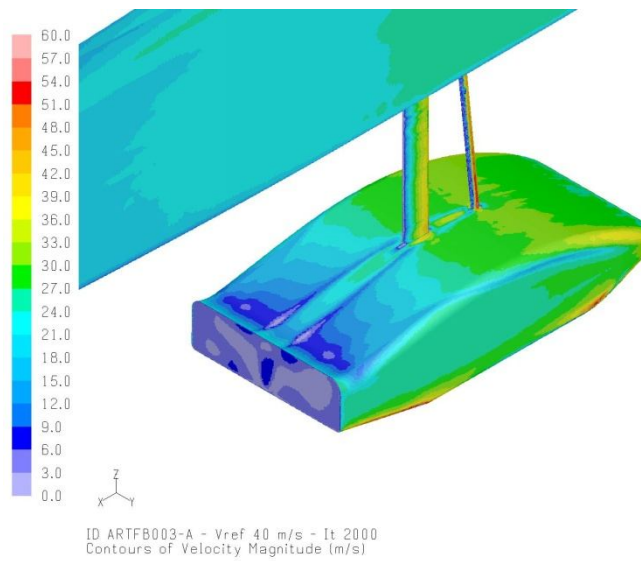
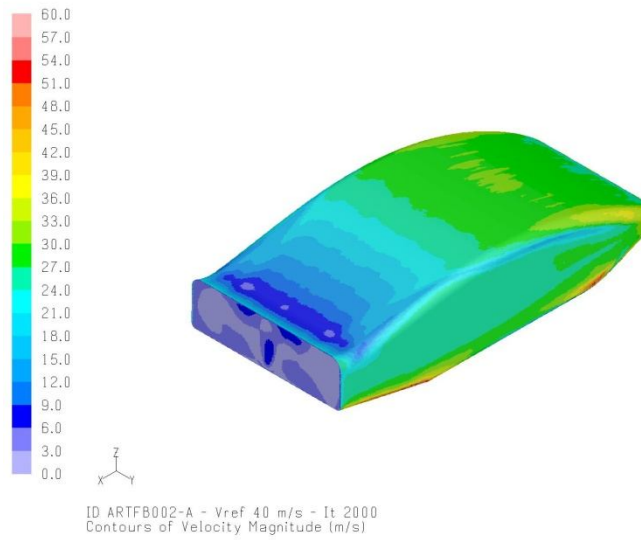
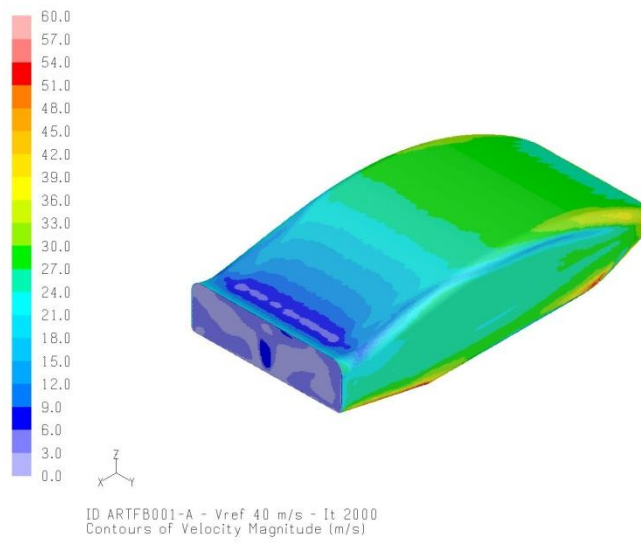


ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

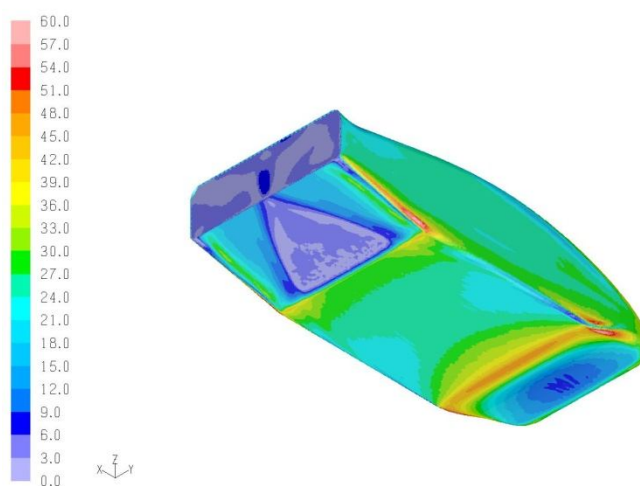


ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

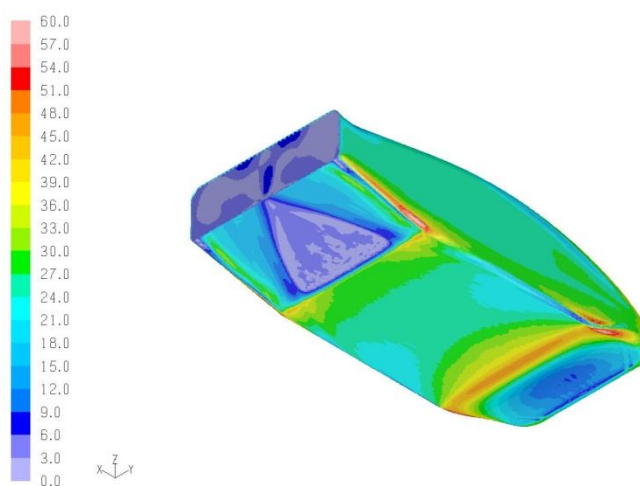
## Capitolo 5 - Discussione dei risultati



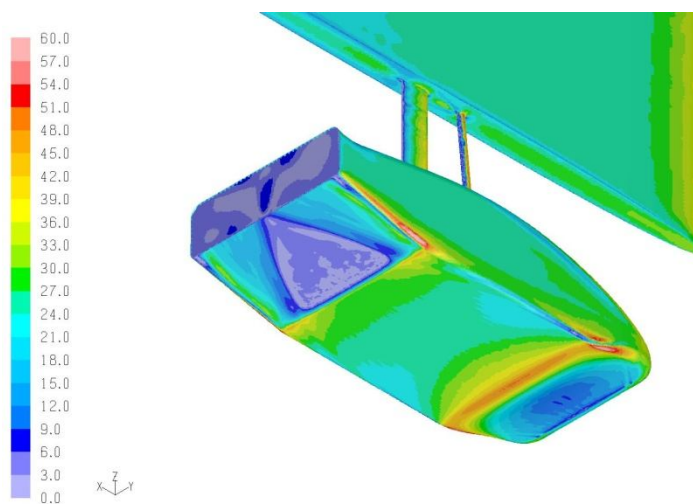
## Rappresentazione del modulo della velocità



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Velocity Magnitude (m/s)



ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Velocity Magnitude (m/s)



ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Differenze di piccola entità nel modulo della velocità in corrispondenza del diffusore anteriore.

Nella parte superiore del modello nel caso di flusso in galleria del vento si osserva una zona di decelerazione nella parte frontale e risulta evidente la scia della struttura di supporto.

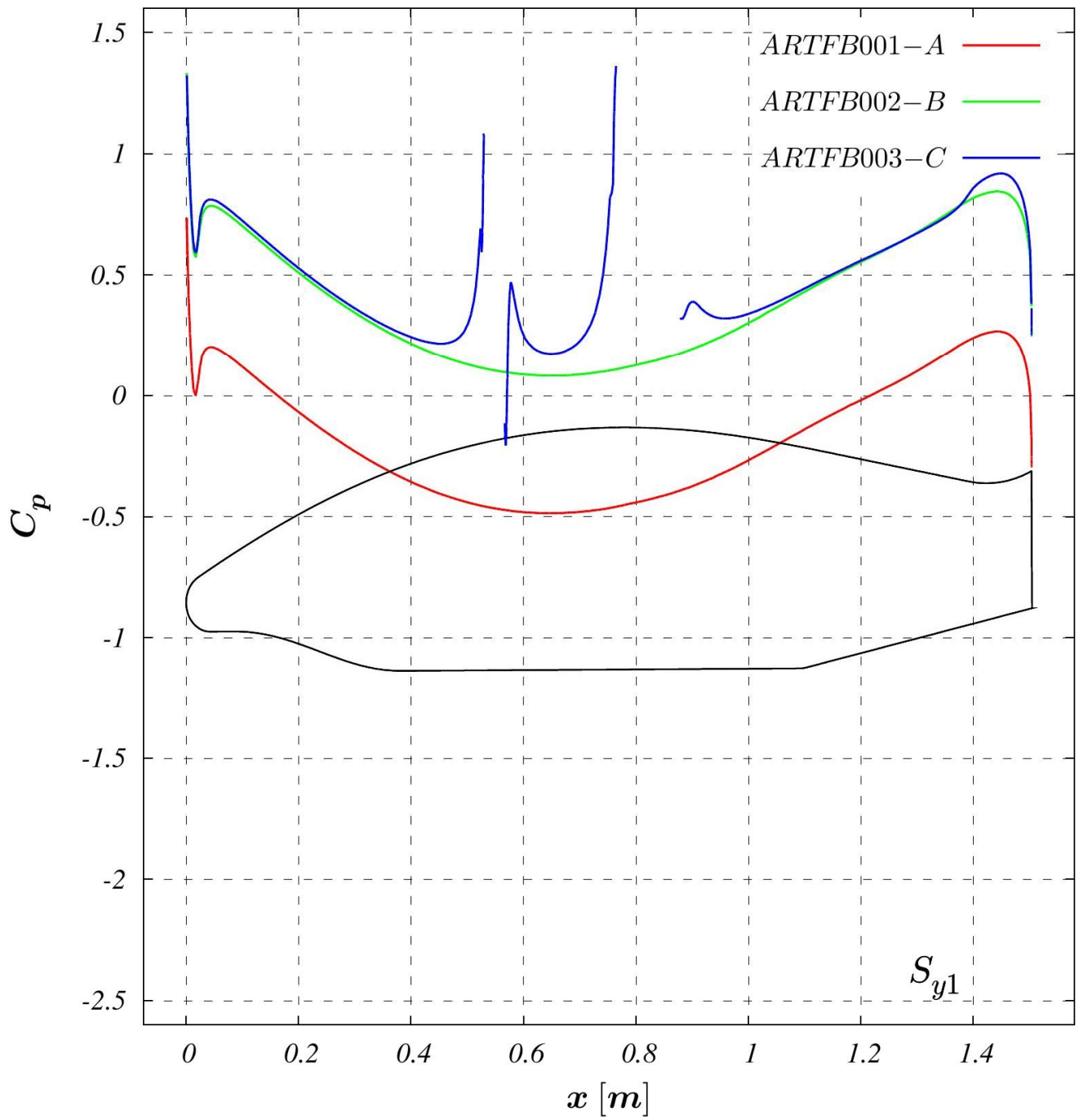
### **5.3 Cp, Artemio in sezione**

Varie sezioni di Artemio sono state fatte allo scopo di investigare l'andamento del coefficiente di pressione, riportate di seguito i casi sovrapposti per le sezioni longitudinali, le più significative.

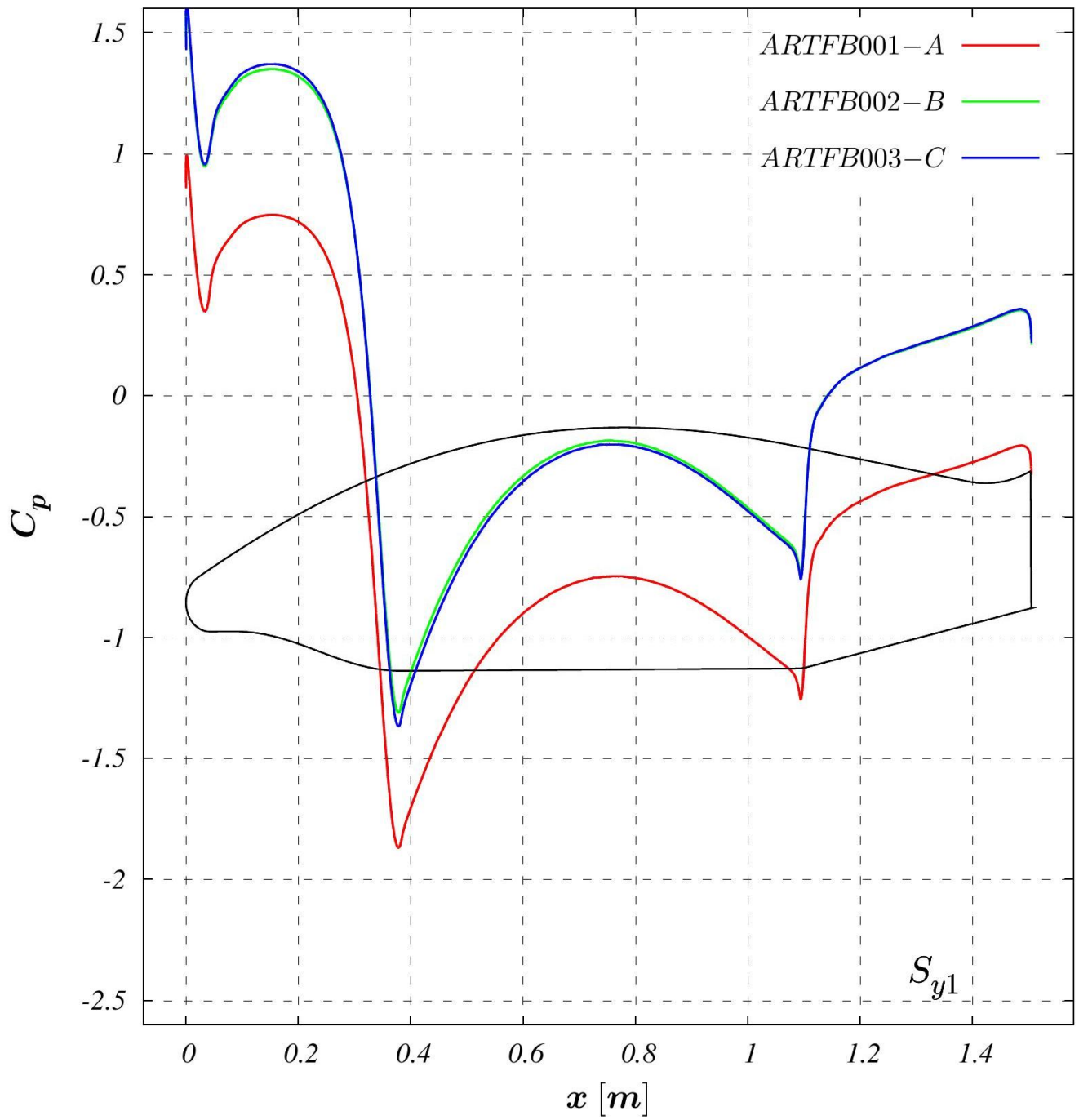
Per i casi singoli effettuati nei piani coordinati si rimanda alla appendice C dove sono disponibili integralmente tutte le immagini.



# Cp Artemio in sezione

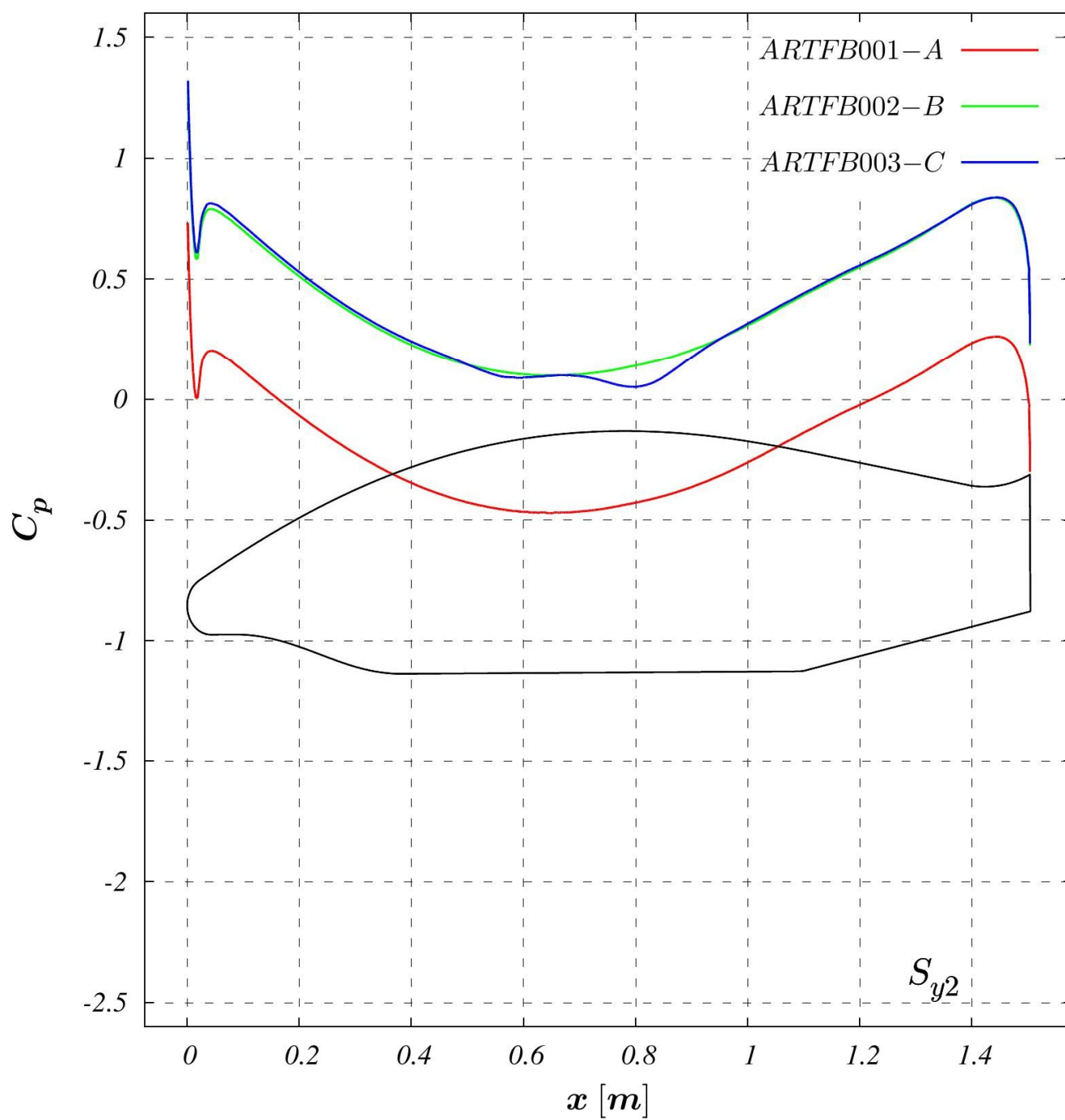


Sezione parte superiore in corrispondenza della mezzeria ( $Y=0$ ).

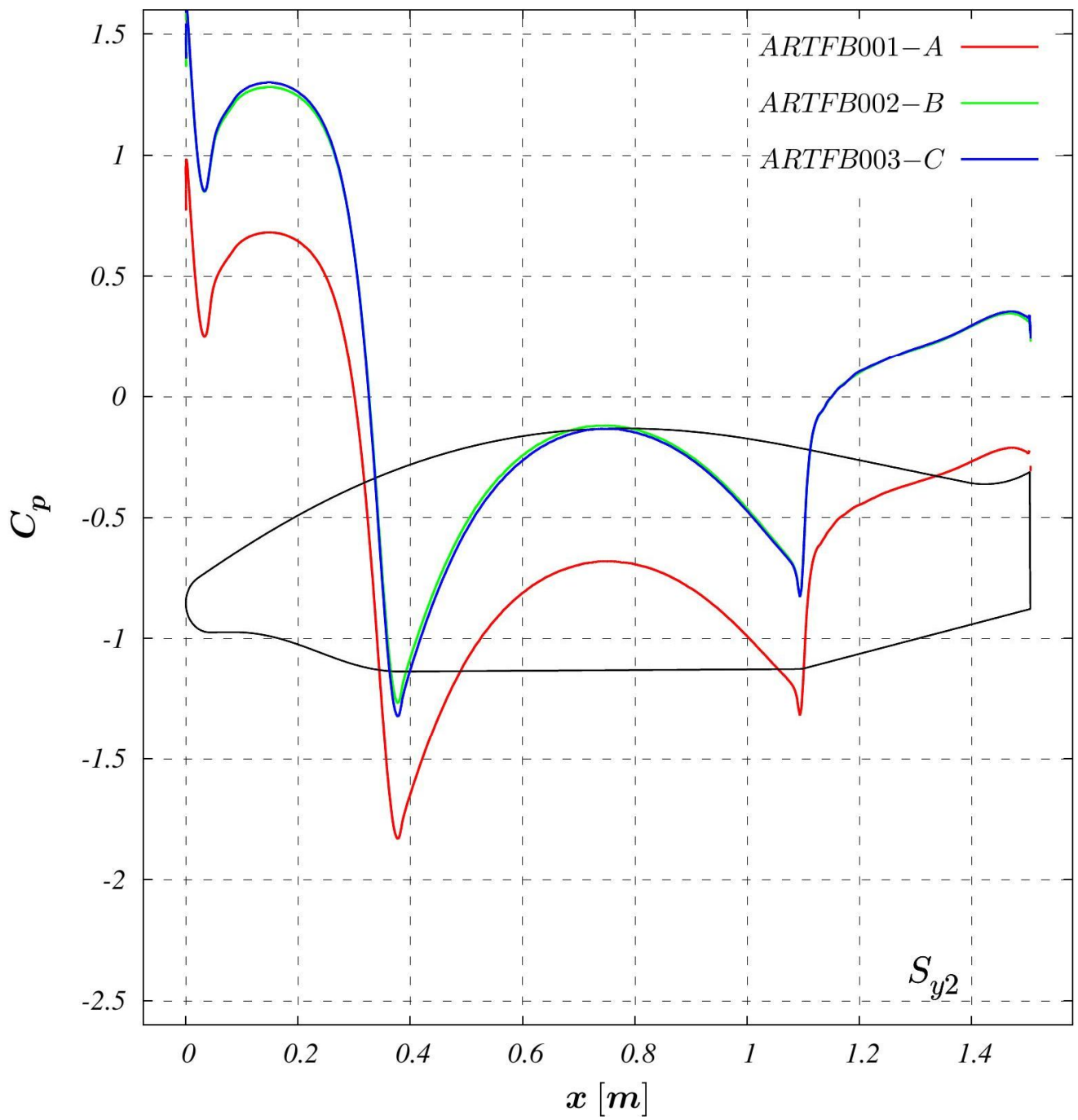


Sezione parte inferiore in corrispondenza della mezzeria ( $Y=0$ ).

# Cp, Artemio in sezione

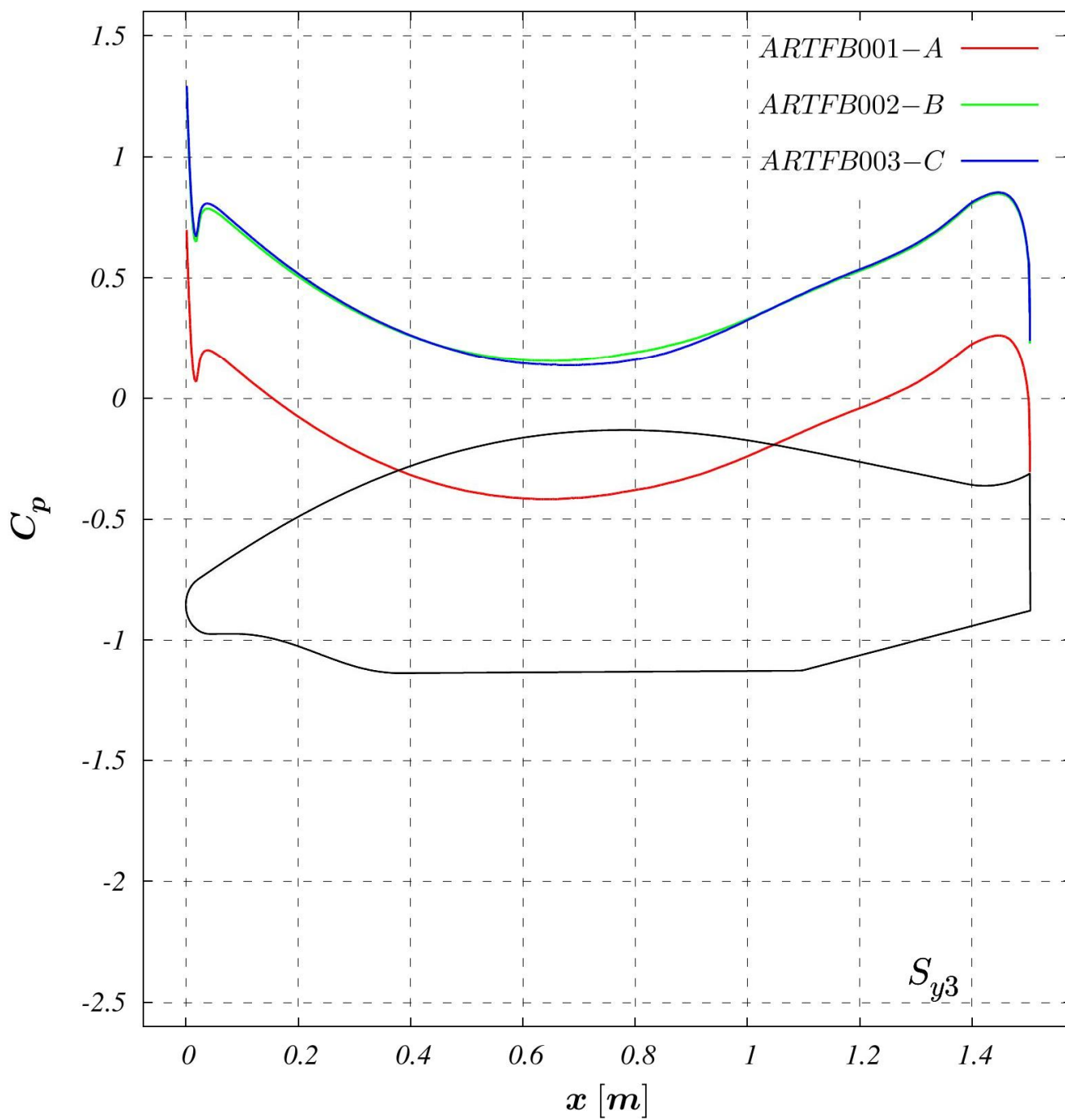


Sezione parte superiore in corrispondenza di 1/3 della  
semi larghezza ( $Y=\pm 113$ ).

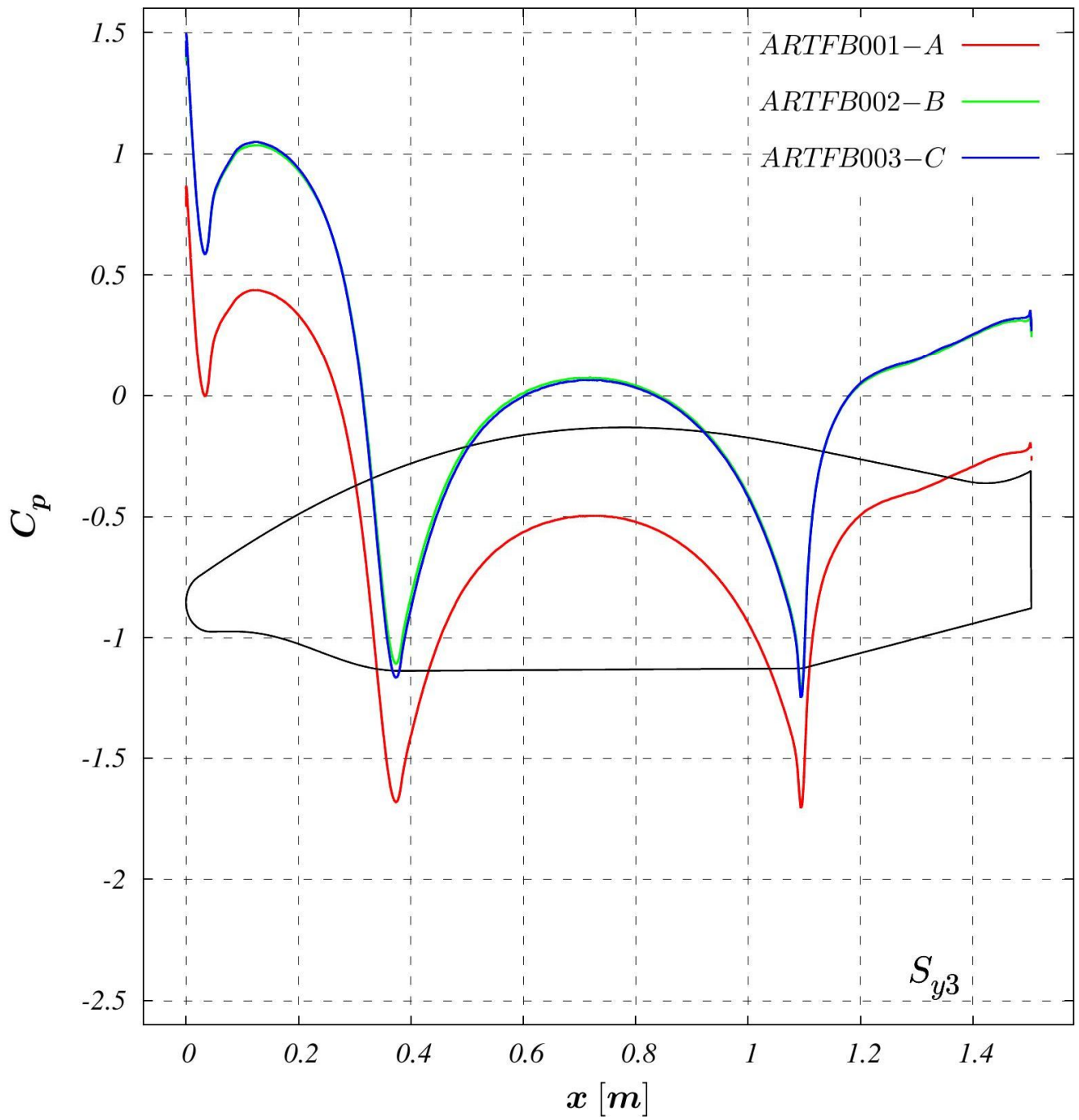


Sezione parte inferiore in corrispondenza di 1/3 della  
semi larghezza ( $Y=\pm 113$ ).

# Cp, Artemio in sezione



Sezione parte superiore in corrispondenza di 2/3 della  
semi larghezza ( $Y=\pm 226$ ).



Sezione parte inferiore in corrispondenza di 2/3 della  
semi larghezza ( $Y=\pm 226$ ).



Si può nuovamente osservare in modo molto evidente la deriva del coefficiente di pressione nei casi in galleria del vento senza e con struttura di supporto rispetto al caso di flusso libero, evidenziando l'entità del coefficiente di pressione che diventa maggiore di 1, con valore di picco corrispondente a 1.6. Questo avviene per effetto del bloccaggio del modello, di dimensioni notevoli rispetto alla sezione della camera di prova nonostante le pareti fessurate, che porta ad avere la parte anteriore del modello in compressione per effetto della ridotta sezione a disposizione per il passaggio del flusso.

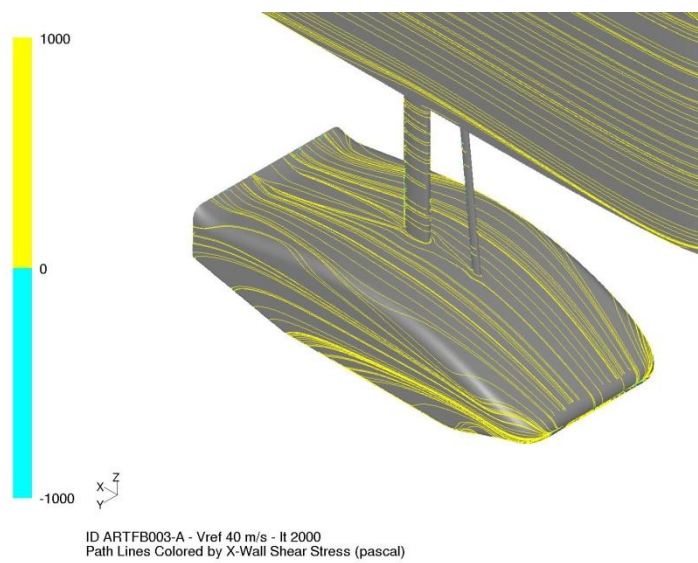
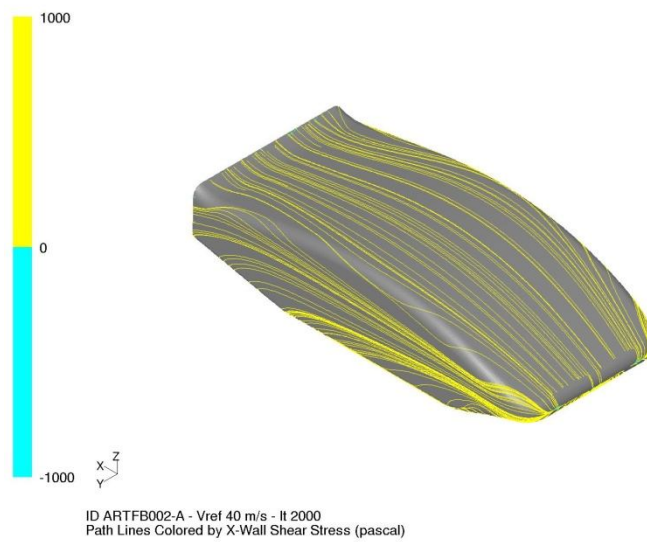
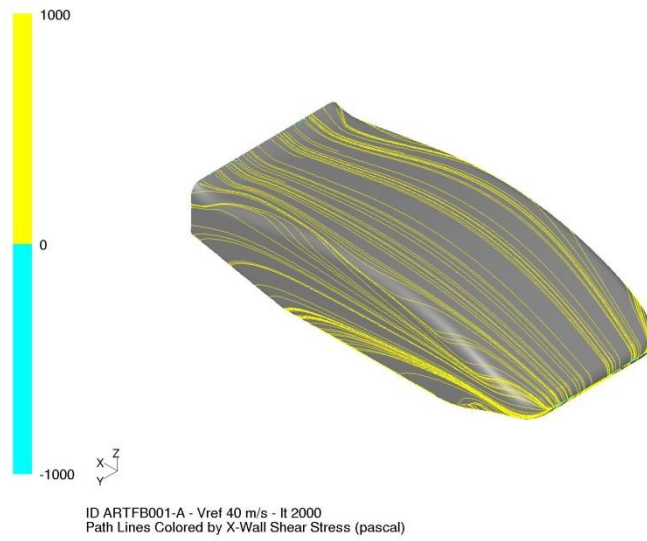
La parte superiore ed inferiore risultano traslate della stessa entità, confermando l'idea secondo cui i valori di  $C_z$  totale molto simili fra loro nei casi di flusso libero e flusso in galleria del vento per il modello completo, sono il risultato di una differenza fra due numeri abbastanza diversi corrispondenti alla parte superiore ed inferiore.

La parte superiore conferma nella mezzeria i punti di ristagno in corrispondenza degli STING, in cui il coefficiente di pressione raggiunge nuovamente valori superiori ad 1 e prossimi ad 1.5, effetti di interazione sono visibili anche ad  $1/3$  della semi larghezza del corpo vettura.

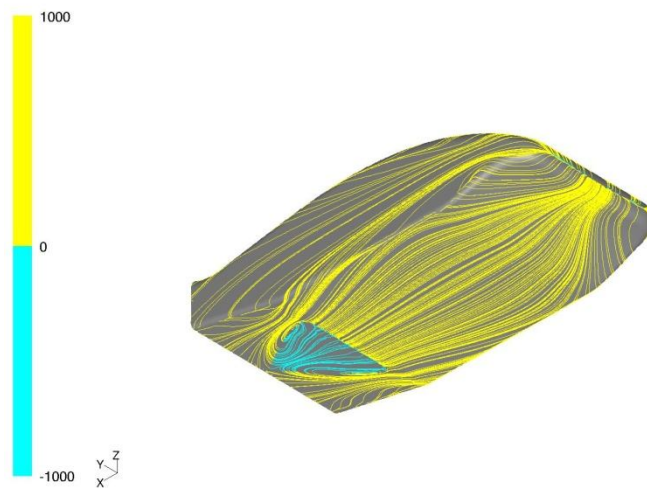
## 5.4 Linee di corrente

Una serie di linee di corrente sono state generate nei due casi di flusso libero e flusso in galleria del vento al fine di evidenziare il tipo di flusso sviluppato dal corpo vettura ed eventuali differenze dovute principalmente alla struttura di supporto.

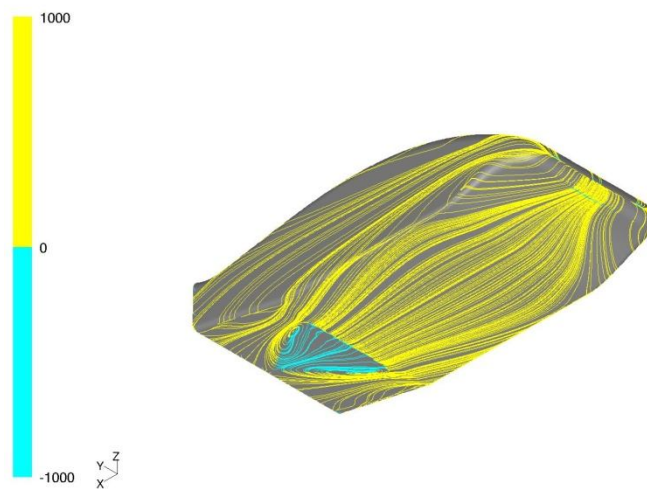
## Capitolo 5 - Discussione dei risultati



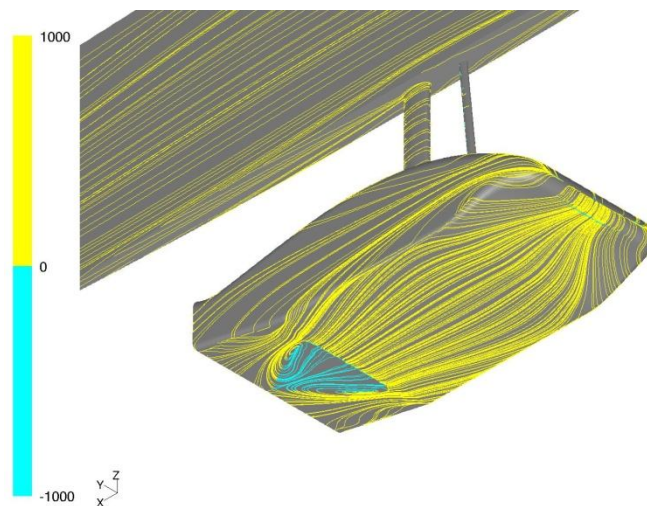
## Linee di corrente



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Path Lines Colored by X-Wall Shear Stress (pascal)

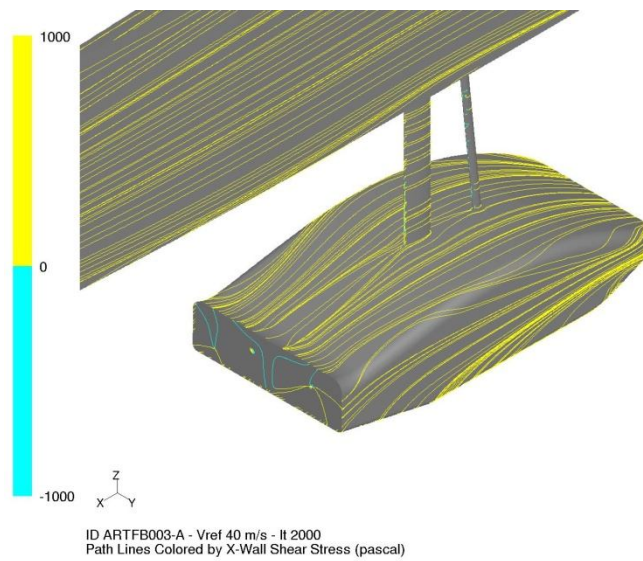
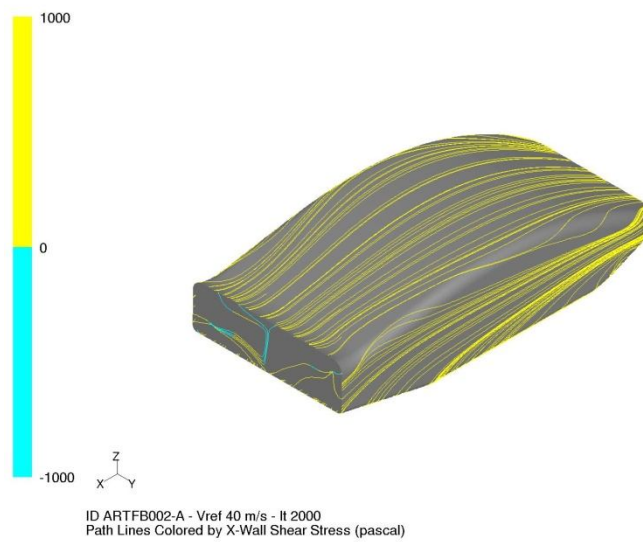
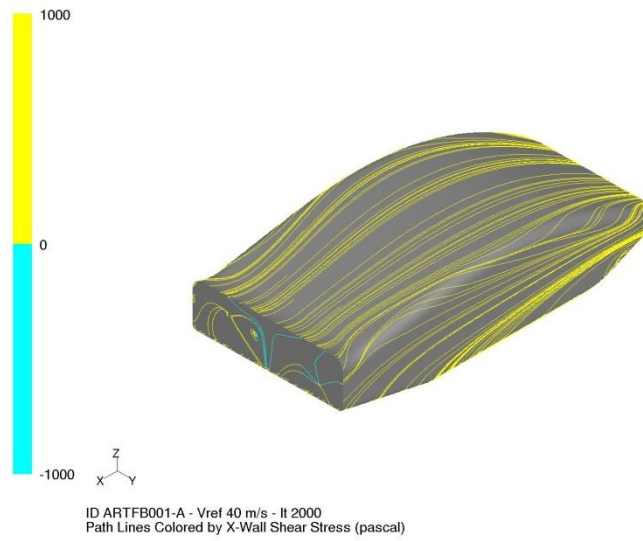


ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Path Lines Colored by X-Wall Shear Stress (pascal)

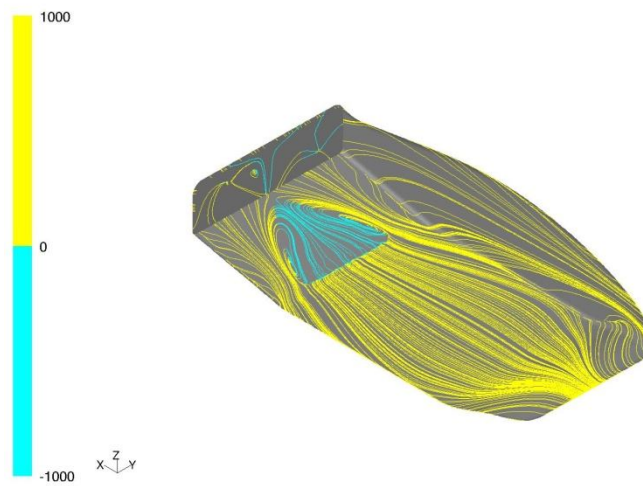


ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Path Lines Colored by X-Wall Shear Stress (pascal)

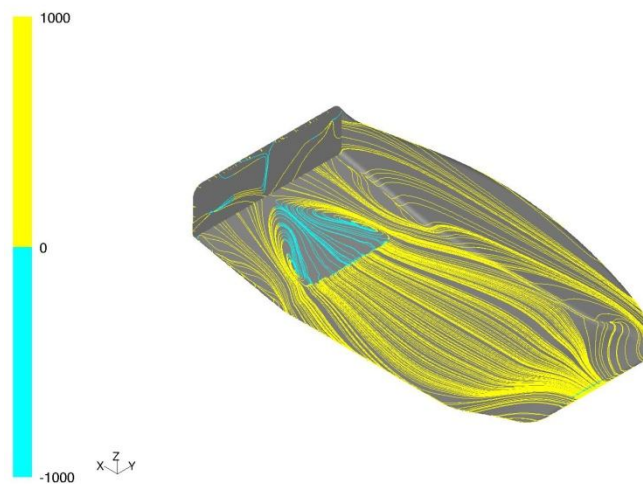
## Capitolo 5 - Discussione dei risultati



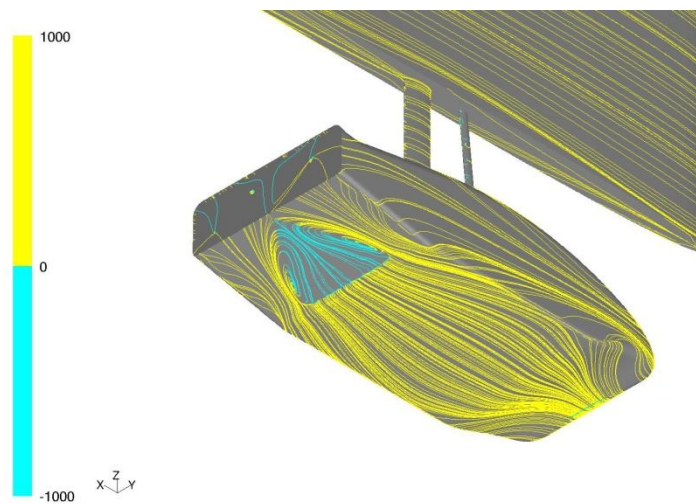
## Linee di corrente



ID ARTFB001-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Path Lines Colored by X-Wall Shear Stress (pascal)



ID ARTFB002-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Path Lines Colored by X-Wall Shear Stress (pascal)



ID ARTFB003-A - Vref 40 m/s - It 2000  
Path Lines Colored by X-Wall Shear Stress (pascal)

Dall'andamento delle linee di corrente nei tre casi è confermato che il tipo di flusso rimane qualitativamente identico, con l'unica eccezione degna di nota rappresentata dalla struttura di supporto, la cui scia è evidenziata sul dorso del caso numero 3.

### **5.5 Linee di corrente - Particolari**

Una serie di linee di corrente sono state generate nei due casi di flusso libero e flusso in galleria del vento al fine di evidenziare il tipo di flusso sviluppato dal corpo vettura ed eventuali differenze dovute principalmente alla struttura di supporto.



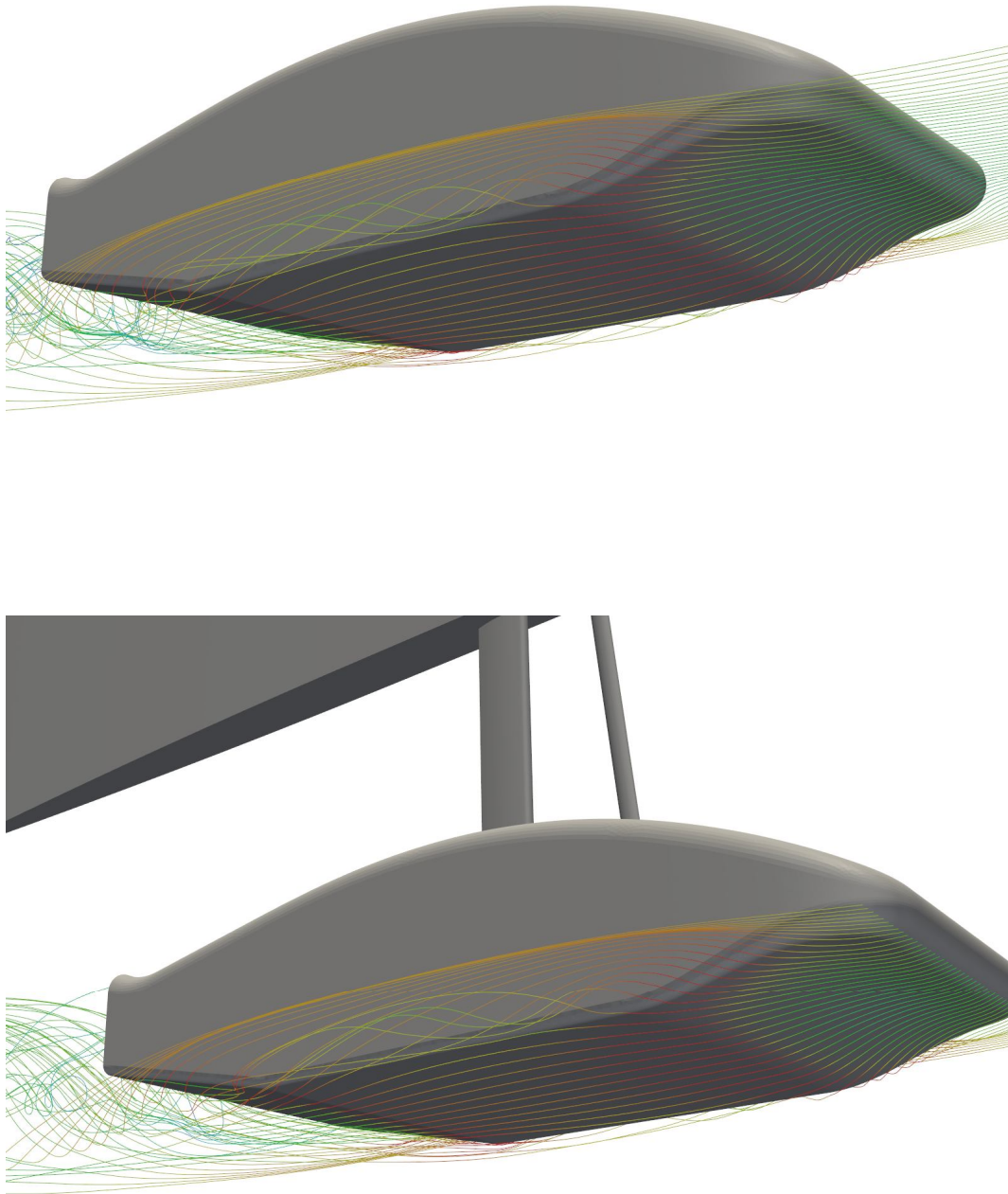


Figure 31 - Linee di flusso sul fondo nei due casi



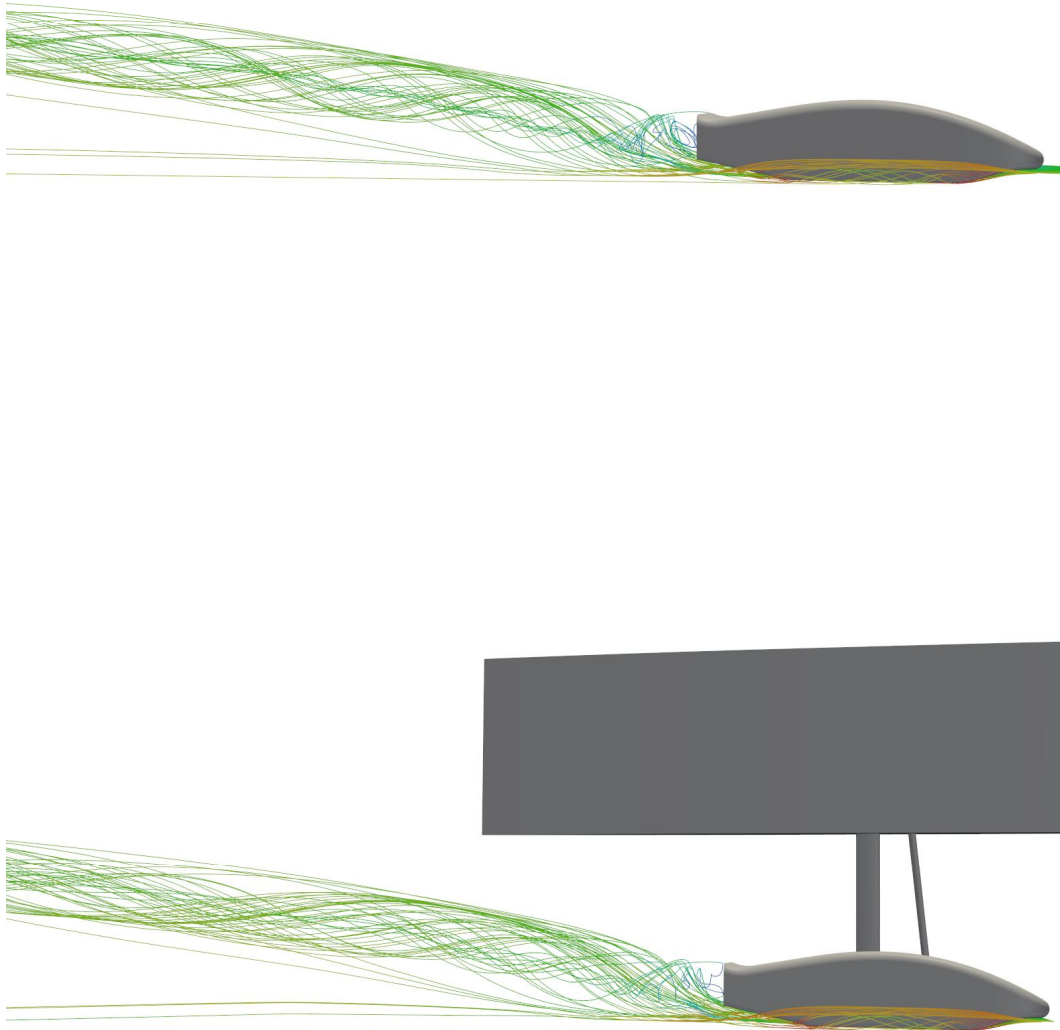


Figure 32 - Linee di flusso in scia nei due casi

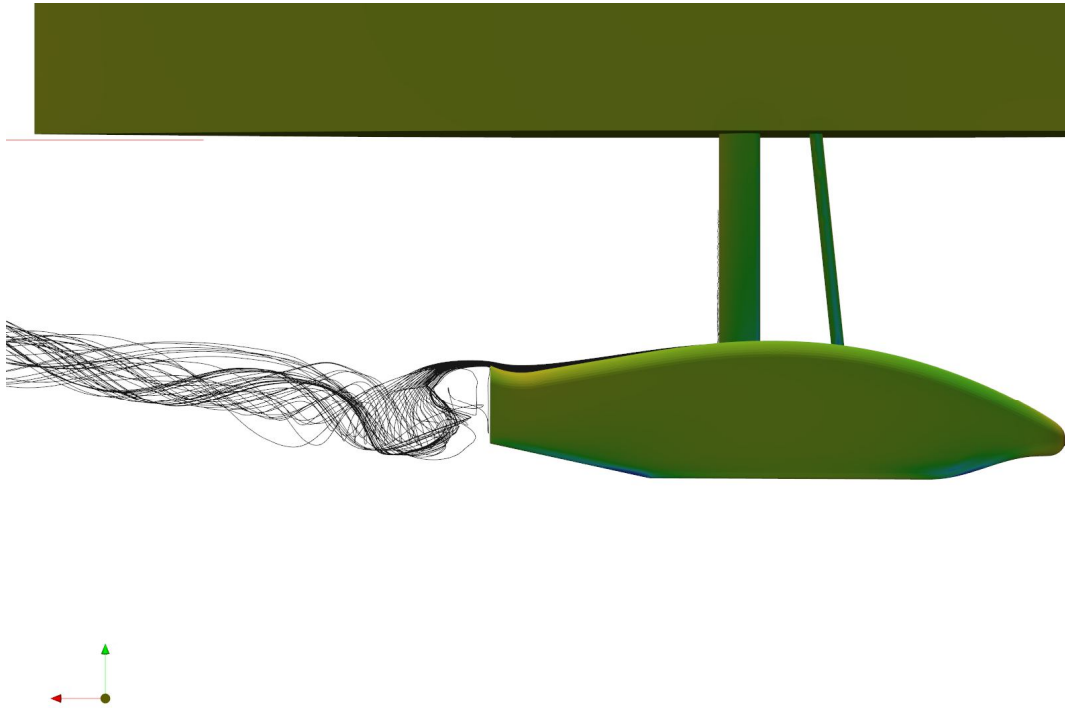


Figure 33 - Particolare della scia - Artemio in galleria

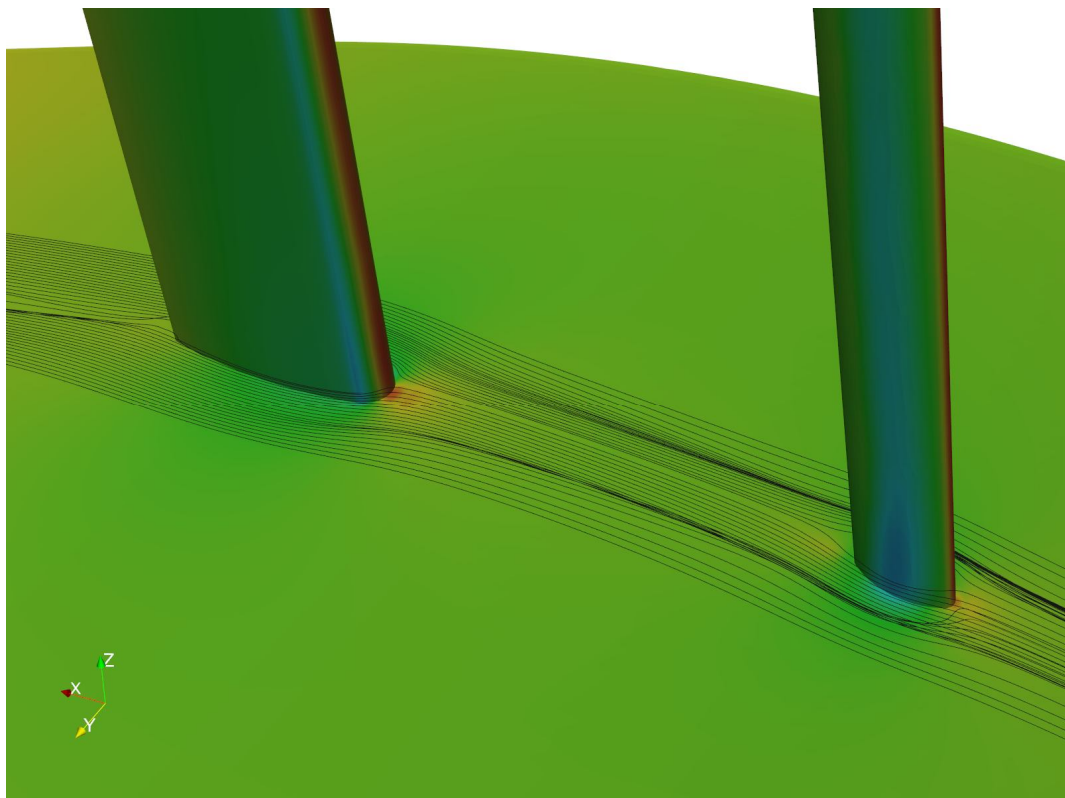


Figure 34 - Particolare della formazione del vortice a ferro di cavallo

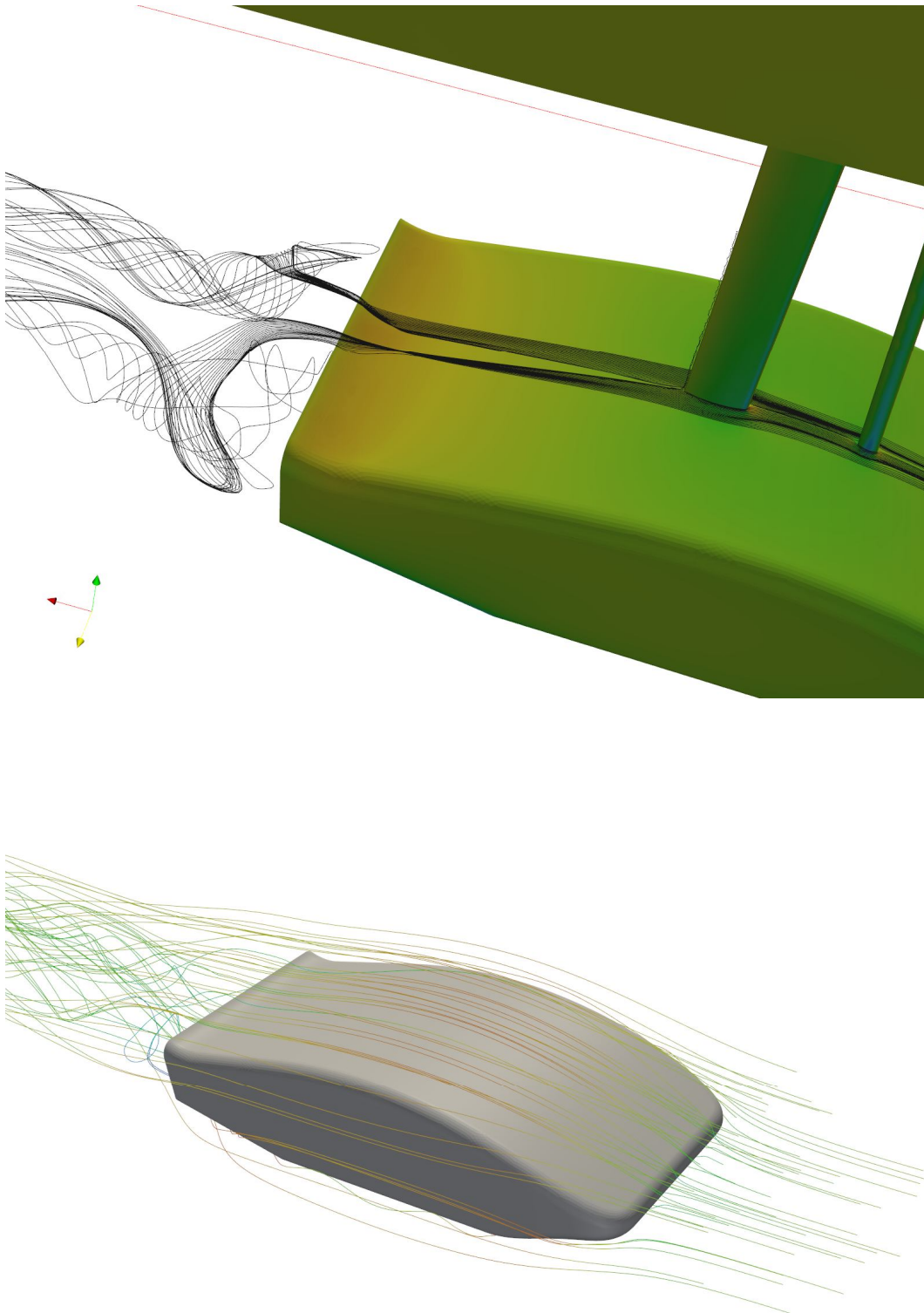


Figure 35 - Particolare della scia sul dorso nei due casi

Dall'analisi dei particolari emerge che il fondo vettura lavora in condizioni molto simili nei vari casi (Figure 36 - Linee di flusso sul fondo nei due casi). Un discorso assolutamente analogo può essere fatto per quanto riguarda la scia, che presenta la stessa struttura nei due casi (Figura 32 – linee di flusso in scia nei due casi).

Particolare attenzione è stata prestata alla zona di intersezione fra STING e corpo vettura, in cui si può osservare la debole formazione di un vortice a ferro di cavallo (Figura 34 – Particolare della formazione del vortice a ferro di cavallo) e la sua trascurabile evoluzione nella scia (Figura 35 – Particolare della scia sul dorso nei due casi).

## 5.6 Risultati numerici

I risultati numerici vengono riportati di seguito (Table 3 - Risultati numerici per i tre casi), così come sono forniti dalla simulazione numerica.

| <i>Cases</i> | $C_x S$ | $-(C_z S)_f$ | $-(C_z S)_r$ | $-C_z S$ | $E$   | $FBal\%$ |
|--------------|---------|--------------|--------------|----------|-------|----------|
| ARTFB001-A   | 0.086   | 0.067        | 0.306        | 0.373    | 4.337 | 17.9%    |
| ARTFB002-A   | 0.096   | 0.064        | 0.323        | 0.387    | 4.049 | 16.6%    |
| ARTFB003-A   | 0.098   | 0.069        | 0.325        | 0.394    | 4.043 | 17.6%    |

Table 2 - Risultati numerici per i tre casi

## Capitolo 5 - Discussione dei risultati

I risultati esportati da FLUENT sono in forma dimensionale di coefficienti per la superficie di riferimento. Questa peculiarità è dovuta alla necessità di interfacciarsi con la galleria del vento, in cui si visualizza in tempo reale il rapporto fra le componenti della forza misurata dalla bilancia e la pressione dinamica:

$$C_f S = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (5.5.1)$$

Per ottenere i coefficienti adimensionali è quindi sufficiente dividere per la superficie di riferimento desiderata, che normalmente corrisponde alla sezione frontale:

$$S_x = 0.2432 \text{ m}^2$$

| <i>Cases</i> | $C_x$ | $-C_{z_f}$ | $-C_{z_r}$ | $-C_z$ | $E$   | $FBal\%$ |
|--------------|-------|------------|------------|--------|-------|----------|
| ARTFB001-A   | 0.354 | 0.276      | 0.874      | 1.065  | 4.337 | 17.9%    |
| ARTFB002-A   | 0.395 | 0.263      | 0.922      | 1.105  | 4.049 | 16.6%    |
| ARTFB003-A   | 0.403 | 0.284      | 0.928      | 1.125  | 4.043 | 17.6%    |

Table 3 - Coefficienti adimensionali per i tre casi

I risultati ottenuti dalla simulazione con FLUENT sono confermati dall'esperienza, essendo in linea con i parametri normalmente osservati in galleria. Infatti se si considera che il corpo di calibrazione non presenta ruote, ali e flussi interni, oltre a non avere nessuna appendice fonte di disturbo come per esempio specchietti o

## Risultati numerici

triangoli sospensione, si capisce come sia possibile ottenere un valore del coefficiente di resistenza così contenuto. Inoltre l'elevata deportanza sviluppata anche senza l'impiego di ali, è dovuta in massima parte al diffusore posteriore e in minor contributo dallo spoiler. Ciò è confermato dalla ripartizione di ben 80% di carico sviluppato al posteriore rispetto al carico totale agente su Artemio.

# 6

## Conclusioni

---

Gli obiettivi principali di questa ricerca sono stati:

- Sviluppare Artemio, un corpo di calibrazione dalle spiccate caratteristiche aerodinamiche tipiche delle automobili da competizione.
- Effettuare accurate simulazioni fluidodinamiche di Artemio, nelle differenti condizioni di flusso libero e flusso in galleria del vento.
- Investigare le interazioni fra il corpo di calibrazione e la galleria del vento, valutandone le approssimazioni.

Il lavoro condotto in questa ricerca per soddisfare questi obiettivi ha portato alla seguenti conclusioni.



### 6.1 Sviluppo del corpo di calibrazione, Artemio

Artemio è stato concepito appositamente per l'impiego specifico in esame, prestando particolare attenzione a caratteristiche aerodinamiche peculiari, sviluppando un corpo vettura deportante con fondo piatto operante in condizioni di effetto suolo, con un ragionevole bilanciamento fra carico agente sulla parte anteriore o sulla parte posteriore e sensibile alle variazioni della distanza dal suolo.

Le prime semplificazioni fatte rispetto ai modelli reali hanno riguardato le ruote ed i flussi interni, entrambi eliminati per ottenere un flusso il più pulito possibile, mentre non sono state inserite ali per non introdurre nel sistema elementi estremamente sensibili alle condizioni di prova, problema che non sussiste per le analisi CFD, ma che è molto sentito per quanto riguarda le prove sperimentali in galleria del vento a cui tale modello sarà destinato.

Il principale elemento assolutamente immancabile in un corpo di calibrazione destinato al settore auto motive sportivo è il fondo piatto, preceduto da uno diffusore anteriore per incrementare il flusso di massa nella parte inferiore del veicolo e a cui segue un ampio diffusore posteriore per incrementare la deportanza sviluppata dal corpo vettura. La parte superiore è costituita dalla zona anteriore in compressione, dalla zona posteriore in depressione, quindi portante col risultato di ridurre il carico verticale totale, ma decisamente caratteristica, a cui segue uno spoiler anch'esso molto caratteristico con cui in parte si annulla la portanza sviluppata nella zona superiore in depressione.

## Conclusioni

Per valutare i valori di pressione in vari punti del modello, al fine di individuare eventuali distacchi e conoscere la distribuzione di pressione sul fondo, la parte superiore ed inferiore di Artemio sono dotate di 92 fori, collegati a degli scanner PSI capaci di convertire la pressione rilevata in voltaggi elettrici inviati al computer di acquisizione dati.

## 6.2 Simulazioni con FLUENT di Artemio

La simulazione di Artemio è eseguita al CFD e si divide in quattro fasi diverse. Inizialmente il corpo è modellato al ProE e il file è salvato come \*.igs, dopodiché i modelli sono importati in ANSA dove si genera la mesh superficiale e si esporta il file \*.msh in Tgrid dove il dominio di prova è creato attorno ad essi, meshato e assegnate le condizioni al contorno. Il file è salvato come \*.msh, esportato in FLUENT in cui è eseguita l'analisi CFD per predire il comportamento aerodinamico del corpo con le particolari condizioni del caso.

Il processo è ripetuto per le varie condizioni al contorno differenti di corpo in flusso libero, corpo in galleria del vento senza e con struttura di supporto, utilizzando i generatori di griglia superficiale e volumetrica commerciali ANSA e Tgrid, seguito dall'analisi CFD tramite il simulatore disponibile in commercio FLUENT 6.3.26.

L'assetto simulato è di 12 mm di altezza per il fittizio asse ruota anteriore e 15 mm per quello posteriore come distanza standard di base per tutti i test, considerato un interasse di 1 metro per la lunghezza complessiva del corpo di 1.5 metri.

## Conclusioni

Si utilizza in prima approssimazione il modello K- $\epsilon$  molto robusto, ma anche dissipativo a causa della notevole viscosità turbolenta introdotta, poi dopo circa 50 iterazioni i risultati sono inseriti nel più accurato modello RSM, scelto in questa indagine come modello di turbolenza in quanto capace di cogliere con precisione il profilo di velocità alla parete, a cui si aggiunge una equazione di parete lineare.

I risultati numerici sono riportati nella tabella sottostante.

| <i>Cases</i> | $C_x$ | $-C_{z\ f}$ | $-C_{z\ r}$ | $-C_z$ | $E$   | $FBal\%$ |
|--------------|-------|-------------|-------------|--------|-------|----------|
| ARTFB001-A   | 0.354 | 0.276       | 0.874       | 1.065  | 4.337 | 17.9%    |
| ARTFB002-A   | 0.395 | 0.263       | 0.922       | 1.105  | 4.049 | 16.6%    |
| ARTFB003-A   | 0.403 | 0.284       | 0.928       | 1.125  | 4.043 | 17.6%    |

I risultati ottenuti dalla simulazione con FLUENT sono confermati dall'esperienza, essendo in linea con i parametri normalmente osservati in galleria. Infatti se si considera che il corpo di calibrazione non presenta ruote, ali e flussi interni, oltre a non avere nessuna appendice fonte di disturbo come per esempio specchietti o triangoli sospensione, si capisce come sia possibile ottenere un valore del coefficiente di resistenza così contenuto. Inoltre l'elevata deportanza sviluppata anche senza l'impiego di ali, è dovuta in massima parte al diffusore posteriore e in minor contributo dallo spoiler. Ciò è confermato dalla ripartizione di ben 80% di carico sviluppato al posteriore rispetto al carico totale agente su Artemio.

### 6.3 Interazioni corpo di calibrazione galleria del vento

Lo studio attuale sugli effetti di interazione fra corpo e galleria del vento è eseguito confrontando i 3 casi in esame.

Rappresentando il coefficiente di pressione, l'andamento qualitativo nei tre casi è molto simile, ciò che appare molto evidente è la deriva del  $C_p$  nei casi in galleria del vento, in cui la pressione è decisamente maggiore rispetto al caso in flusso libero. Elemento estremamente importante è il diffusore anteriore, che lavora in condizioni diverse nei casi in galleria del vento in cui risulta essere in compressione. La scia dello sting influenza l'intensità del coefficiente di pressione nella parte posteriore del modello, in particolare sullo spoiler.

Differenze di piccola entità nel modulo della velocità in corrispondenza del diffusore anteriore. Nella parte superiore del modello nel caso di flusso in galleria del vento si osserva una zona di accelerazione nella parte frontale e risulta evidente la scia della struttura di supporto.

Varie sezioni di Artemio nei tre piani coordinati sono effettuate. Dalla sovrapposizione dei tre casi a varie coordinate nel piano longitudinale, si può nuovamente osservare in modo molto evidente la deriva del coefficiente di pressione nei casi in galleria del vento senza e con struttura di supporto rispetto al caso di flusso libero, evidenziando l'entità del coefficiente di pressione che diventa maggiore di 1, con valore di picco corrispondente a 1.6. Questo avviene per effetto del bloccaggio del modello, di dimensioni notevoli

## Conclusioni

rispetto alla sezione della camera di prova nonostante le pareti fessurate, che porta ad avere la parte anteriore del modello in compressione per effetto della ridotta sezione a disposizione per il passaggio del flusso.

La parte superiore ed inferiore risultano traslate della stessa entità, confermando l'idea secondo cui i valori di  $C_z$  totale molto simili fra loro nei casi di flusso libero e flusso in galleria del vento per il modello completo, sono il risultato di una differenza fra due numeri abbastanza diversi corrispondenti alla parte superiore ed inferiore.

La parte superiore conferma nella mezzeria i punti di ristagno in corrispondenza degli STING, in cui il coefficiente di pressione raggiunge nuovamente valori superiori ad 1 e prossimi ad 1.5, effetti di interazione sono visibili anche ad  $1/3$  della semi larghezza del corpo vettura.

Allo scopo di evidenziare differenze nel tipo di flusso nei tre casi, sono state generate linee di corrente dalla cui analisi nei particolari emerge che il fondo vettura lavora in condizioni molto simili nei tre casi. Un discorso assolutamente analogo può essere fatto per quanto riguarda la scia, che presenta la stessa struttura.

Particolare attenzione è stata prestata alla zona di intersezione fra STING e corpo vettura, in cui si può osservare la debole formazione di un vortice a ferro di cavallo e la sua trascurabile evoluzione nella scia.



# Appendice

Le appendici per questioni di praticità e di spazio occupato, considerato che si sta parlando di circa 700 immagini, sono riportate nel DVD allegato e contengono tutti i dati disponibili.

Sono riportate le immagini dei tre casi rappresentanti il coefficiente di pressione, il modulo della velocità,  $Y_{wall+}$  e le linee di corrente nei tre piani coordinati, in assonometria e in casi speciali.

Sono disponibili i dati numerici elaborati da FLUENT, le mesh di superficie e volume, effettuate con ANSA e Tgrid, le sezioni nei tre piani coordinati con i casi singoli e sovrapposti rappresentanti il coefficiente di pressione, nonché il disegno del corpo al ProE.



# Bibliografia

- [1] G. Doria, C. Rovini; *Aerotecnica volumi I, II, III*; ETS Editrice, Pisa; 1990.
- [2] E. Mattioli; *Aerodinamica*, terza edizione; Levrotto e Bella, Torino; 1994.
- [3] E. Benzing; *Ali, studio per tecnici e piloti di auto da corsa*; Automobilia, Milano; 1991.
- [4] A. Pope, J. J. Harper; *Low Speed Wind Tunnel Testing*; Ed. John Wiley and sons Inc., New York; 1999.
- [5] A. Ricciardi; *Aerodinamica subsonica e supersonica*; Centro studi aeronautici, Roma; 1989.
- [6] FLUENT 6 Theory guide.
- [7] G. K. Rajamani; *CFD Analysis of Air Flow Interactions in Vehicle Platoons*; RMIT University; 2006.
- [8] G. Franck, J. D'Elia; *CFD modeling of the flow around the Ahmed vehicle model*; CIMEC Argentina.
- [9] H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker; *Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)*.
- [10] R. J. Le Veque; *Numerical Methods for Conservation Law*; Birkhauser Verlag, Basel Boston Berlin; 1992.

- [11] R. H. Barnard; *Aerodynamics of Road Vehicles*; Fourth Edition, Society of Automotive Engineers; Warrendale Pa; 1998.
- [12] P. Gillieron, F. Chometon; *Modelling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows Around an Ahmed Reference Model*; In ESAIM proc., volume 7; 1999.
- [13] W. H. Hucho; *Aerodynamics of Road Vehicles*; Fourth Edition, SAE Int.; Warrendale Pa; 1998.
- [14] G. Le Good, K. P. Garry; *On the use of Reference Models in Automotive Aerodynamics*; SAE Paper; 2004.
- [15] T.Nouzawa, K.Hiasa, M.Yoshimoto, S. Haruna; *Influence of Geometry of Rear Part on the Aerodynamic Drag and Wake Structure of a Vehicle*; Mazda Motor Corp, Technical Report, 1992.
- [15] G. H. Romberg, F. Chianese, R. G. Lajoie; *Aerodynamics of Race Cars in Drafting and Passing Situations*; SAE Paper 710213, 1971.
- [16] D. B. Sims-Williams, and R. G. Dominy; *Experimental Investigation into Unsteadiness and Instability in Passenger car Aerodynamics*; SAE Paper 980391; 1998.
- [17] A. Spohn, P. Gillieron; *Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle*; IUTAM Symposium; 2002.
- [18] R. K. Strachan, K. Knowles, N. J. Lawson; *CFD and Experimental Study of an Ahmed Reference Model*; SAE Paper; 2004.

# Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare la Dallara, una grande azienda in cui ho il privilegio di lavorare, tutti i colleghi e in particolare l'ingegnere Elisa Serioli il cui contributo a questo lavoro è stato assolutamente fondamentale, l'ingegnere Andrea Vecchi responsabile delle gallerie del vento, per il notevole supporto fornito per questo lavoro ed ogni giorno in galleria, e l'ingegnere Dialma Zinelli responsabile del settore aerodinamica che alcuni anni fa ha creduto in me dandomi la possibilità di entrare nel mondo fantastico delle corse.

Ringrazio tutti i colleghi dell'università con cui ho condiviso questa lunghissima avventura ed il professore Giovanni Lombardi, per la disponibilità e il supporto datomi nello svolgimento del presente lavoro.

Ringrazio tutti gli amici, Alessio e Sofia, che in quel di piazza Dante non mi hanno mai fatto annoiare, Marco unico supporto nel portare un po' di ordine, Francesco che ha messo la testa a posto si è sposato e presto non giocherà più a World of Warcraft e Francesco per la bella vacanza a cui mi sono imbucato all'ultimo momento.

Ringrazio anche tutti i compagni motociclisti con cui passo sempre giornate divertenti e rigeneranti, ognuno col suo personale stile di guida, ognuno con la propria meravigliosa moto.

Ringrazio i compagni di studi con cui ho condiviso tante "dure" giornate di studio al campus, in particolare Alberto e Paolo per le

numerose consulenze informatiche, che mi hanno fatto risparmiare tanto tempo e fatica.

Ringrazio Paul... per avermi dimostrato che esistono anche francesi simpatici, cordiali e da ammirare.

Ringrazio Corinna per essermi sempre vicino, in qualunque momento, in qualunque circostanza, per cui non esistono parole adatte a descrivere ciò che penso.

In fine, ma non certo per ordine di importanza ringrazio la mia famiglia... per avere sempre creduto in me (anche quando ne dubitavo persino io) ed avermi dato la possibilità di fare ciò che desideravo, per avermi sempre dato tutto ciò che potevano, per avere cercato di rimanermi vicino in qualunque momento, anche i più difficili.

Grazie a tutti

*Loris*